THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

Le Grade de DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

par

Tanneguy LE MARÉCHAL
ancien élève de l'Ecole Polytechnique

1re THÈSE : **Contribution à l'étude expérimentale d'un écoulement d'air dans un faisceau de tubes avec transfert de chaleur.**

2e THÈSE : **Propositions données par la Faculté**

Problèmes posés par les écoulements dans les amplificateurs fluides.

Soutenues le 21 octobre 1966, devant la Commission d'examen

MM. FORTIER — Président

SIESTRUNCK, COMOLET — Examinateurs

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

Le Grade de DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

par

Tanneguy LE MARÉCHAL
ancien élève de l'École Polytechnique

1re THÈSE : **Contribution à l'étude expérimentale d'un écoulement d'air dans un faisceau de tubes avec transfert de chaleur.**

2e THÈSE : **Propositions données par la Faculté**

Problèmes posés par les écoulements dans les amplificateurs fluides.

Soutenues le 21 octobre 1966, devant la Commission d'examen

MM. FORTIER — Président
SIESTRUNCK, COMOLET — Examinateurs

UNIVERSITÉ DE PARIS – FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Professeurs

Le Doyen
M. ZAMANSKY

MM.	PRENANT	T Anatomie & histologie comparée
	GRASSE	T Evolution des êtres organisés
	PREVOST	T Chimie organique
	WYART	T Minéralogie & cristallographie
	TEISSIER	T Zoologie
	AUGER	T Physique quantique & relativité
	MONNIER	T Physiologie générale
	PIVETEAU	T Paléontologie
	ROCARD	T Physique E.N.S.
	CARTAN	T Mathématiques E.N.S.
	LAFFITTE	T Chimie générale
	N...	T Géométrie supérieure
	COULOMB	T Physique du globe
Mlle	COUSIN	T Biologie animale SPCN
MM.	CHRETIEN	T Chimie minérale
	BOCQUET	T Zoologie
	KASTLER	T Physique E.N.S.
	EPHRUSSI	T Génétique
	GAUTHERET	T Biologie végétale CPEM
	LUCAS R.	Recherches physiques
	THOMAS A.	T Biologie cellulaire
	MORAND	T Physique enseignement
	SOLEILLET	T Physique CPEM
	FORTIER	T Mécanique expérimentale des fluides
	DRACH	T Zoologie
	QUENEY	T Météorologie & dynamique de l'atmosphère
	GALLIEN	T Embryologie
	EICHHORN	T Botanique
	DE CUGNAC	T Biologie végétale SPCN
Mlle	CAUCHOIS	T Chimie physique
MM.	THELLIER	T Physique du globe
	PONCIN	T Mécanique générale
	DUBREIL	T Arithmétique & théorie des nombres
	QUELET	T Chimie organique
	CAGNIARD	T Géophysique appliquée
	CHAMPETIER	T Chimie macromoléculaire
	CUVILLIER	T Micropaléontologie
	JUNG	T Géologie
	TRILLAT	T Microscopie & diffraction électronique
	WIEMANN	T Chimie organique & structurale
	VASSY	T Physique de l'atmosphère
	DESTOUCHES	T Théorie physique
	AMIEL	T Chimie générale
	HOCART	T Minéralogie & cristallographie
	J. P. MATHIEU	T Physique optique
	COUTEAUX	T Cytologie
	CHOQUET	T Théorie des fonctions & topologie
	FELDMANN	T Biologie végétale marine
	JOST	T Physiologie comparée
	FORTET	T Calcul des probabilités & physique mathématiques
	SCHWARTZ	T Calcul différentiel & intégral
	CHOUARD	T Physiologie végétale
	MALAVARD	T Aviation (technique aéronautique)
	BRELOT	T Analyse supérieure
	NORMANT	T Synthèse organique
	BENARD	T Chimie appliquée
	DUGUE	T Statistique mathématique
	SOULAIRAC	T Psychophysiologie
	ULRICH	T Physiologie végétale appliquée
	KIRRMANN	T Théories chimiques
	CHADEFAUD	T Botanique
Mlle	LE BRETON	T Physiologie de la nutrition
MM.	LELONG	T Application de l'analyse à la géométrie
	DEVILLERS	T Anatomie & histologie comparées
	EHRESMANN	T Topologie algébrique
	FRANÇON	T Physique SPCN
	GLANGEAUD	T Géographie physique, géologie dynamique
	DODEMENT	T Mathématiques MGP
	PISOT	T Technique mathématique de la physique
	ROCH	T Géologie
	SCHATZMANN	T Astrophysique
	TERMIER	T Géologie générale
	ZAMANSKY	T Mathématiques générales
	LENNUIER	T Physique M.G.P.
	ROUTHIER	T Géologie appliquée
Mme	TONNELAT	T Physique théorique
MM.	DIXMIER	T Mathématiques M.P.C.
	SOUCHAY	T Chimie générale
	AIGRAIN	T Electrotechnique
	BRUSSET	T Chimie systématique
M.	LEVY	T Physique théorique des hautes énergies
Mme	CHAIX	T Chimie biologique
	HUREL PY	T Biologie végétale CPEM
MM.	PANNETIER	T Chimie générale 1
	BRUN	T Mécanique des fluides I
Mme	DUBREIL	T Mathématiques (Agrégation)
Mme	LELONG	T Mathématiques II E.N.S.
MM.	BELLAIR	T Géologie S.P.C.N.
	COTTE	T Physique électricité
	DUBOIS J.E.	T Chimie organique physique
	LAMOTTE	T Zoologie E.N.S.
	GLMER	T Energétique générale
	GAUTHIER	T Mécanique appliquée
	BARCHEWITZ	T Chimie physique
	BROSSEL	T Physique atomique
	BUSER	T Physiologie comparée
	CAMUS	T Physiologie végétale
	CURIEN	T Minéralogie & cristallographie
	POSSOMPES	T Zoologie
	PULLMANN	T Chimie quantique
	TEILLAC	T Physique nucléaire & radio-activité
	VILLE	T Econométrie
	WILLEMART	T Chimie CPEM
	FREYMANN	T Recherches physiques
	ROLLET	T Chimie minérale
Mlle	JOSIEN	T Chimie SPCN
MM.	CHEVALLEY	T Géométrie algébrique & théorie des groupes
	GERMAIN	T Mécanique théorique des fluides
	LUCAS G.	T Géologie
	ALLARD	T Chimie physique
	BERTHELOT	T Physique des particules fondamentales
	BRICARD	T Météorologie
Mme	ALBE-FESSARD	T Psycho-physiologie
MM.	JULIA	T Etude des molécules naturelles complexes
	MAGAT	T Physico-chimie des rayonnements
Mlle	QUINTIN	T Electrochimie
MM.	MONOD	T Chimie du métabolisme
	DE POSSEL	T Analyse numérique
	CHARLOT	T Chimie analytique
	CHATELET	T Chimie CPEM
	MATTLER	T Physique SPCN
	BOUISSIERES	T Radiochimie
Mme	COUTURE	T Thermodynamique & mécanique physique
MM.	FRANC	T Biologie animale CPEM
	SCHNELL	T Botanique tropicale
	STOLKOWSKI	T Physiologie générale
	ACHER	T Chimie biologie
	BAUDOIN	T Biologie animale CPEM
	BEAUMONT	Biologie animale SPCN
	BLAMONT	Géophysique ionosphère
	BOUREAU	T Botanique
	CURIE D.	Physique MGP
	DURAND DELGA	T Géologie
	HELLER	T Physiologie végétale
	TORTRAT	T Calcul des probabilités
	CAILLEUX	T Géologie SPCN
	MAGNAN	Physique électricité
	DAUDEL	T Mécanique ondulatoire
Mlle	FOURCROY	Biologie végétale SPCN
Mme	CHOQUET BRUHAT	Mécanique analytique & mécanique céleste
Mlle	VEIL	T Physiologie générale
MM.	LWOFF	T Microbiologie
	SIESTRUNCK	T Mécanique physique & expérim.
	CABANNES	T Mécanique générale
	CAIRE	T Géographie physique & géologie dynamique
	COMOLET	Mécanique des fluides
	DELLOUE	T Physique de l'exosphère
	HOUILLON	Biologie animale CPEM
	OLIVIER	Anthropologie
	SAMUEL	T Mathématiques (ENS Jeunes filles)
	THIRY	T Mécanique céleste
	ABELES	T Physique SPCN
	AMAT	T Thermodynamique
	AUBOIN	T Géologie
Mme	BENOIT-GUEUTAL	T Physique nucléaire & radio-activité
M.	BOUGIS	Biologie végétale marine Villefranche s/Mer
MM.	RIGAUDY	T Chimie SPCN
	COLLONGUES	Chimie CPEM
	DUBERT	Biochimie
	NOZIERES	Physique générale
	CADIOT	Chimie organique
	IVANOFF	Océanographie physique
	FRANÇOIS	Zoologie
	TALBOT	Génie chimique
Mme	NOUGAREDE	Botanique
MM.	BRUHAT	T Mathématiques MPC
	FOURNET	Electricité générale
	DEHEUVELS	T Mathématiques propédeutique
	FURON	T Géologie SPCN
Mme	GANS	T Génétique
MM.	GENEVES	Biologie végétale CPEM
	HUPE	T Pétrographie
	HOLLANDE	T Biologie générale
	LIONS	T Analyse numérique
	MAITTE	T Chimie organique
	NICOLAS	Géologie appliquée
	PANIGEL	Biologie générale
	RAVIER	T Pétrographie
	MOREL F.	T Physiologie comparée
	ROSEAU	T Mécanique théorique des fluides
	ROUBINE	Electronique E.S.E.
	SILBER	T Chimie CPEM
	UEBERSFELD	T Electronique
	HERVE	T Théories physiques
		T Mathématiques
Mme	PECKER-WIMEL	T Astrophysique
MM.	BALKANSKI	Physique M.P.C.
	LE CORRE	T Electricité
	NATAF	T Physique nucléaire & radio-activité
	ECHALIER	Biologie animale CPEM
	BARRAUD	T Physique CPEM
	DARS	Géologie structurale & appliquée
	CAMEFORT	T Botanique (agrégation)
	VICHNIEWSKY	T Mécanique industrielle
	SIGWALT	T Chimie SPCN
	BLAQUIERE	Electronique
	BARUCH	Physique propédeutique
	ARNOUS	T Physique théorique
	SLONIMSKI	Génétique
	MALLIAVIN	T Mathématiques propédeutique
	GAUDEMAR	Chimie propédeutique
	BROUSSE	T Mécanique théorique
	ROSCH	T Astronomie
	GUY	T Physique expérimentale
	LAZARD	Mathématiques MPC
	MOREL P.	Physique MPC
	ARSAC	Programmation
	LEFEBVRE	Chimie MPC
	BOK	Physique propédeutique
	CHAPEVILLE	Biochimie
	BENOIT	Physique CPEM
	RIO	Chimie CPEM
	JAUZEIN	Géologie ENS
	PREVOST G.	Biologie végétale CPEM
	FAVARD P.	Biologie animale CPEM
Mme	CHARNIAUX-COTTON	Evolution des êtres organisés
Mlle	FICINI	Chimie CPEM
MM.	LEQUEUX	Astronomie
	COHEN TANNOUDJI	Physique atomique
	TAVERNIER	Physique CPEM
	DURAND Michel	Biologie animale SPCN
	PASCAUD	Physiologie
Mme	PETIT	Biologie animale CPEM
MM.	CAGNAC	Physique agrégation
	FALK-VAIRANT	Physique nucléaire
	KRASNER	T Mathématiques
	BENZECRI	T Statistiques
	VINH MAU	Physique M.G.P.
	DUQUESNES	Physique CPEM
	SCHUTZENBERGER	Programmation
	TREMILLON	Chimie MPC
	FAVARD	Chimie MPC
	BUVET	Chimie CPEM
	AUTHIER	Physique MPC
	PICINBONO	T Physique CPEM
	BONNEFILLE	Electrotechnique
Mme	PUISEUX DAO	Biologie végétale

UNIVERSITÉ DE PARIS – FACULTE DES SCIENCES D'ORSAY

Professeurs

MM.	MANGENOT G.	T Biologie végétale
	JACQUINOT P.	T Optique
	GUINIER A.	T Electricité & physique des solides
	GRIVET P.	T Electronique
	BLANC-LAPIERRE A.	T Accélérateur linéaire
	L'HERITIER P.	T Génétique des virus
	LEMEE G.	T Ecologie végétale
	MOYSE A.	T Physiologie végétale
	DODE M.	T Chimie thermodynamique
	DENY J.	T Mathématiques
	RIVIERE A.	T Géologie générale & sédimentologie
	MICHEL A.	T Chimie minérale
	MAY R.	T Anatomie comparée
	DELANGE H.	T Mathématiques
	CHAPELLE J.	T Physique expérimentale
	LACOMBE P.	T Métallurgie
	BENOIT P.	T Physiologie générale
	GUINOCHET J.	T Biologie végétale SPCN
	NERON A.	T Mathématiques
	NOZERAN R.	T Botanique approfondie
	CASTAING R.	T Thermodynamique
	ELLENBERGER F.	T Géologie structurale
	LEDERER E.	T Chimie biologique
	RIZET J.	T Génétique
	LENDER T.	T Biologie animale SPCN
	POITOU G.	T Mathématiques
	FREON P.	T Chimie organique
	TONNELAT	T Biologie physico-chimique
	BRUNN Jan	T Géologie historique
	JEAN M.	T Physique nucléaire
MM.	BERGERARD J.	T Zoologie
	ROGER J.	T Paléontologie
	LEFORT M.	T Chimie nucléaire
	LAGARRIGUE A.	T Physique des hautes énergies
	JULLIEN J.	T Chimie structurale organique
	ARNULF A.	T Optique
	ROUAULT M.	T Diffraction électronique
	MARECHAL A.	T Optique théorique et appliquée
	MAZET R.	T Mécanique générale
	DAVID Serge	T Chimie agrégation
	GUERIN H.	T Chimie des gaz et des combustibles
	LESIEUR L.	T Mathématiques MPC et algèbre
	KOURGANOFF	T Astronomie
	ARNOULT P.	T Physique électronique
	KAHANE J.P.	T Mathématiques
	BROCHARD J.	T Physique propédeutique
Mme	ROIZEN	T Physique C.P.E.M.
MM.	BERTEIN F.	T Electronique
	MALGRANGE B.	T Mathématiques
	CORABOEUF E.	T Physiologie animale
	FRIEDEL J.	T Physique des solides
	CHEVAUGEON J.	T Cryptogamie
	MEYER P.	T Physique théorique & atomique
	LEHMANN P.	T Accélérateur linéaire
	CHABBAL R.	T Physique propédeutique
	DELCROIX J.M.	T Physique des plasmas
	CERF J.	T Mathématiques
	D'ESPAGNAT B.	T Physique théorique
	SCHAEFFER P.	T Microbiologie
	DE GENNES P.	T Physique des solides
Mme	MARTY N.	Physique propédeutique
MM.	GOURDIN M.	Physique théorique
	PEREZ-Y-JORBA	Physique propédeutique
	GORENFLOT E.	Biologie végétale SPCN
	RIOU M.	Physique nucléaire
	BROUSSE R.	Géologie S.P.C.N.
	LIORET C.	Physiologie végétale
	CLAUSER H.	Chimie biologique
	JANCOVICI B.	Physique atomique
	LURCAT J.	Physique propédeutique
	LE BERRE J.	Entomologie
	LAVOREL J.	Biophysique
	PERIO P.	Physique propédeutique
	FETIZON M.	Stéréochimie
	CHEMLA M.	Chimie des isotopes
	MAZIERES C.	Chimie SPCN
	VILKAS M.	Chimie C.P.E.M.
	BLANDIN A.	Physique des solides
	BRUN G.	Génétique
	MERCOUROFF	Physique agrégation
	ANDRE J.	Microscopie électronique
	CHEVALLIER F.	Physiologie animale
Mlle	MARCOU	Biologie cellulaire C.P.E.M.
MM.	BOURDU R.	Physiologie végétale
	BERKALOFF A.	Biologie animale CPEM
Mlle	LEFORT M.	Biologie cellulaire CPEM
Mme	LAMBERT	Physique C.P.E.M.
MM.	BIZOT J.C.	Physique M.P.C.
	GUIRAUD J.P.	Mécanique
	LABOUESSE B.	Chimie SPCN

AVANT-PROPOS

Les travaux relatifs à cette thèse ont été effectués au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou. Nous remercions la Direction des Etudes et Recherches de l'Electricité de France d'avoir permis le développement de cette étude et l'ensemble du personnel du Centre pour l'aide constante qu'il nous a apportée.

Nous exprimons notre profonde gratitude à M. le Professeur FORTIER qui nous a constamment guidé dans nos recherches en nous prodiguant de précieux conseils.

Nous remerçions vivement MM. les Professeurs SIESTRUNCK et COMOLET d'avoir bien voulu siéger à la Commission d'Examen.

Nos remerciements s'adressent également à M. FAURE, Chef du Département "Mécanique des Fluides" qui a toujours facilité avec bienveillance le développement de cette étude ainsi qu'à M. CASEAU, Chef de Groupe et M. RONAT, Ingénieur à ce même Département, pour l'aide efficace qu'ils nous ont apportée pour la résolution numérique des calculs effectués dans le cadre de cette thèse.

Ce travail a été effectué dans le cadre de la "Botte Recherche" instituée par le décret 59-808 du 4.7.59. M. WINTER, Examinateur des élèves, a été désigné pour en assurer le parrainage au sein du Conseil d'Instruction de l'Ecole Polytechnique. Nous sommes heureux de le remercier pour la courtoisie et la bienveillance avec lesquelles il s'est acquitté de cette tâche.

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	7
I - REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	9
Notations	10
I.1 - Etudes expérimentales sur l'écoulement autour du cylindre	11
I.1.1 - Généralités	11
I.1.2 - Les mesures dans la région proche du cylindre	12
I.1.3 - Les mesures dans le sillage éloigné	13
I.1.4 - Les mesures dans le sillage proche	13
I.2 - Etudes théoriques sur l'écoulement autour d'un cylindre	15
I.2.1 - Remarques préliminaires	15
I.2.2 - La solution de Helmholtz-Kirchhoff	15
I.2.3 - Les travaux de A. Roshko	16
I.2.4 - Autres théories du sillage	17
I.2.5 - Recherches sur la forme du sillage	18
I.2.6 - Conclusions	18
I.3 - Etudes concernant les faisceaux tubulaires	21
I.3.1 - Etudes à caractère expérimental concernant le fonctionnement global des échangeurs	21
I.3.2 - Etudes à caractère fondamental	22
II - MESURES RÉALISÉES AVEC UN TUBE ISOLÉ	25
Notations	26
II.1 - Dispositif expérimental	27
II.1.1 - Le circuit général	27
II.1.2 - La section d'essais	28
II.1.3 - Les appareils d'exploration	30
II.2 - Mesures dans le sillage à l'aide d'un anémomètre à fil chaud à intensité constante	35
II.2.1 - Théorie du fil chaud pour la mesure des vitesses et températures moyennes	35
II.2.2 - Réalisation pratique des fils chauds	36
II.2.3 - Réalisation des mesures - Etalonnage des fils	38
II.2.4 - Essais de mesure simultanée de la vitesse et de la température dans le sillage du tube à l'aide de fil chaud	41

Pages

II.2.5 - Mesure de la température seule au moyen du fil chaud 42
II.2.6 - Mesure de la vitesse seule au moyen du fil chaud 44
II.2.7 - Conclusions 44

II.3 - Autres appareils de mesure essayés sur le circuit avec le tube isolé. 47

II.3.1 - La sonde à thermistance 47
II.3.2 - Mesures de la pression à la paroi du cylindre 49
II.3.3 - Conclusions 51

III - ÉTUDE D'UN FAISCEAU TUBULAIRE 53

Notations 54

III.1 - Dispositifs expérimentaux 57

III.1.1 - Description générale 57
III.1.2 - Le système de refroidissement des tubes 59
III.1.3 - Possibilités de l'échangeur 59

III.2 - Résultats expérimentaux 63

III.2.1 - Mesure de la pression à la paroi des tubes 63
III.2.2 - Mesure de la température dans le faisceau 65

III.3 - Calcul de la couche-limite dans le faisceau 69

III.3.1 - Les équations de la couche-limite laminaire - Leur transformation 69
III.3.2 - Méthode de résolution numérique des équations 72
III.3.3 - Application de cette méthode aux tubes du faisceau - Hypothèses et justifications 73
III.3.4 - Conduite pratique du calcul - Résultats généraux 74
III.3.5 - Analyse du transfert thermique dans le faisceau 75
III.3.6 - Comparaison des résultats obtenus avec et sans transfert thermique - Evolution de l'écoulement dans le faisceau 77
III.3.7 - Conclusions 78

CONCLUSION 79

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 83

ANNEXES (RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET COURBES) 87

I - Température dans le sillage du tube isolé (fil de platine) 88
II - Vitesse dans le sillage (fil chaud) 90
III - Température dans le sillage (thermistance) 92
IV - Pression à la paroi du cylindre isolé 94
V - Pression à la paroi des tubes du faisceau 97
VI - Température de l'air dans le faisceau 99
VII - Résultats groupés des calculs de couche-limite 121

INTRODUCTION

Parmi les divers types d'échangeurs de chaleur, ceux qui sont constitués par des faisceaux de tubes jouent un rôle important dans le monde actuel. Ils forment les éléments de base des générateurs de vapeur classiques. Si l'on excepte les tubes d'écran, où se fait la vaporisation, les autres échangeurs : resurchauffeurs, surchauffeurs haute et basse température, économiseurs, sont formés de faisceaux tubulaires. Pour améliorer les performances des générateurs de vapeur, il devient indispensable de s'intéresser aux échangeurs tubulaires et en particulier à l'écoulement des gaz dans le faisceau, puisque le transfert de chaleur est conditionné presque uniquement par les résistances calorifiques à la surface du tube en contact avec les gaz, qui sont de beaucoup les plus importantes.

Une étude expérimentale d'échangeurs peut être axée sur la connaissance des coefficients globaux d'échanges. Pour que l'on obtienne une précision acceptable, on doit prendre de grandes précautions pour supprimer ou tout au moins évaluer correctement les pertes de chaleur parasites et, dans ce cas, on peut difficilement faire sur la même installation une étude fine du phénomène. Inversement si l'on s'intéresse plus particulièrement aux mesures à l'intérieur même du faisceau. les difficultés d'accès obligent à concevoir des mécanismes de traversée compliqués interdisant la mise en place d'un calorifuge efficace. De plus, la complexité de l'écoulement (du moins aux nombres de Reynolds usuels) nécessite la mise au point de méthodes de mesure particulières.

Une étude à caractère théorique est également délicate et ne peut être que limitée. Pour chacun des tubes, deux régions sont difficilement accessibles à un raisonnement théorique rigoureux : la partie arrière où prend naissance le sillage et la partie avant soumise à l'interaction éventuelle du sillage des tubes de la rangée précédente. Pour le reste de la surface d'échange, on peut faire un calcul de couche-limite, à condition de pouvoir se servir de données expérimentales car, surtout lorsque l'écoulement n'est pas isotherme, il serait vain de déduire les vitesses à la paroi d'un calcul d'écoulement en fluide parfait par exemple.

Devant toutes ces difficultés, nous avons volontairement choisi un échangeur de géométrie simple : il est formé de cent tubes circulaires de 20 mm de diamètre disposés "en ligne" et d'espacement entre axes 40 mm (dans le sens longitudinal et le sens transversal). Ainsi, comme on le verra, ces dimensions relativement importantes ont permis une exploration de l'écoulement entre les tubes : de plus la disposition régulière de cet arrangement a pu autoriser un développement intéressant de l'étude théorique.

Avant la construction de l'échangeur, il nous a paru utile de faire un certain nombre d'essais sur un tube isolé identique aux tubes du faisceau, placé dans un écoulement transversal d'air. Ainsi il a été possible de mettre au point les méthodes de mesures prévues pour l'échangeur "cent tubes", en particulier de déterminer les caractéristiques du mécanisme de traversée. De plus, cet écoulement a été l'objet de nombreuses études qui nous ont fourni des points de repère.

Dans une première partie, nous ferons un tour d'horizon des diverses publications parues à ce jour traitant des problèmes d'écoulement autour d'un cylindre isolé et à l'intérieur d'un faisceau, tant du point de vue expérimental que du point de vue théorique. En particulier nous nous intéresserons au problème de la détermination du sillage des corps arrondis.

Dans la deuxième partie, nous rendrons compte des résultats expérimentaux obtenus en explorant l'écoulement autour du cylindre isolé.

Dans la dernière partie, nous nous intéresserons surtout à l'échangeur complet : nous rendrons compte des mesures effectuées à l'intérieur du faisceau : nous exposerons la méthode de calcul de couche limite laminaire compressible mise au point pour cette étude : nous présenterons enfin les résultats obtenus en appliquant ce calcul aux tubes de l'échangeur.

Première partie

Revue bibliographique des études réalisées sur l'écoulement autour d'un cylindre isolé et dans un faisceau de tubes

Principales notations utilisées dans la première partie

Indices

o - Fluide à l'infini amont.

p - fluide à la paroi.

s - Point de décollement.

x, y - Coordonnées cartésiennes.

u, v - Composantes de V suivant x, y.

V - Vitesse (V_o parallèle à Ox).

ρ - Masse volumique.

P - Pression.

μ - Viscosité dynamique.

λ - Conductivité thermique.

c_p - Chaleur massique à pression constante.

q_m - Débit massique.

D - Diamètre.

θ - Distance angulaire au point d'arrêt. (pour un cylindre circulaire).

N - Fréquence de détachement des tourbillons.

$S_T S_L$ - Espacements entre axes dans un faisceau, transversal et longitudinal.

Nombres sans dimension : Re - Nombre de Reynolds

C_x - Coefficient de traînée $\left(\text{rapportée à } \frac{1}{2}\rho_o V_o^2\right)$,

K_p - Coefficient de pression : $\frac{p - p_o}{1/2\ \rho_o V_o^2}$

$\mathcal{S}$ - Nombre de Strouhal $\frac{N.D}{V}$

$k = \sqrt{1 - K_p}$

Chapitre I

Études expérimentales sur l'écoulement autour d'un cylindre

I.1.1 - GÉNÉRALITÉS.

L'écoulement autour d'un cylindre peut avoir des aspects très différents selon le nombre de Reynolds (voir [1] p. 126); cela se traduit par exemple par des variations brutales du coefficient de traînée C_x lorsque l'on passe d'un régime à l'autre. La courbe de la figure I.1.1 peut se diviser en trois parties :

1 - Re < 50 (environ) - région d'écoulement stable.

2 - Re < 10^5 " - régime instable.

3 - Re > 10^5 " - régime turbulent.

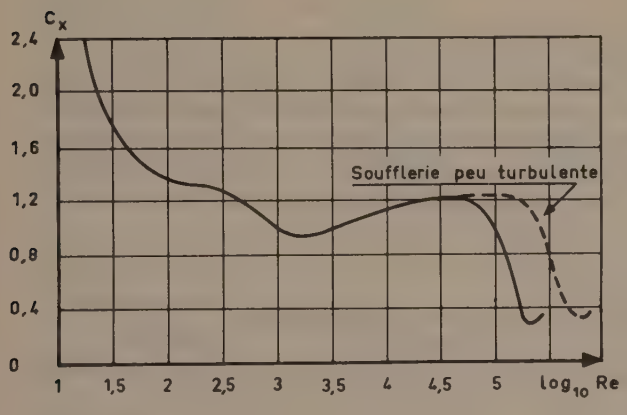


Figure I.1.1 - Variation du coefficient de traînée du cylindre en fonction du nombre de Reynolds (d'après [2] p. 419).

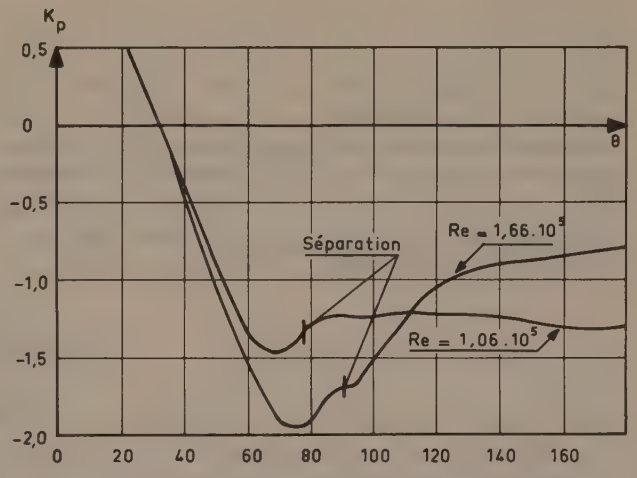


Figure I.1.2 - Pression à la surface du cylindre. Aspect de la courbe pour deux régimes d'écoulement différents (d'après [3]).

Le passage du régime 2 au régime 3 se fait à des nombres de Reynolds variables, dépendant de la turbulence propre de l'écoulement à l'amont du cylindre. La figure I.1.2 rend bien compte des différences essentielles entre ces deux régimes d'écoulement : la pression sur la face arrière du cylindre augmente, le point de décollement est repoussé vers l'aval (la couche-limite devient turbulente avant de décoller). Cela entraîne une décroissance brutale du coefficient de traînée.

Nous nous intéresserons plus particulièrement aux nombres de Reynolds compris entre 5000 et 50 000 environ. Cela correspond aux caractéristiques de l'écoulement dans des échangeurs tubulaires. La couche-limite reste laminaire depuis le point d'arrêt jusqu'au point de décollement. Avec ces hypothèses, on peut distinguer trois régions dans l'écoulement.

La région amont et la région très proche du cylindre.

C'est-à-dire pratiquement la couche limite et le début du sillage : l'écoulement n'est pas instable et on peut faire des mesures mais avec des appareils de dimensions très réduites.

La région éloignée à l'aval du cylindre (25 diamètres environ).

Les instabilités dans le sillage se sont amorties et sont à l'échelle d'une turbulence mesurable. La direction de la vitesse n'est plus soumise à des fluctuations incessantes et on peut utiliser des appareils de mesure classiques.

La région intermédiaire du sillage.

Dans cette région les mesures sont très difficiles et surtout leur interprétation est délicate. Malheureusement c'est la région intéressante lorsqu'on étudie des échangeurs dont les tubes sont relativement peu éloignés les uns des autres.

I.1.2 - LES MESURES DANS LES RÉGIONS PROCHES DU CYLINDRE.

Dès 1928, Fage et Johansen [4] exploraient la région où prennent naissance les tourbillons qui forment le sillage par la suite. Ils avaient mis au point un appareil constitué d'un tube de prise de pression totale et d'un fil chaud. Ils mesuraient la direction de la vitesse en plaçant le fil dans le sillage du tube de prise de pression. A ce moment ils pouvaient mesurer la pression totale et la grandeur de la vitesse par le fil chaud. A partir de ces données expérimentales, ils calculaient le rotationnel de l'écoulement et la pression statique. Ils purent ainsi déterminer les limites des allées tourbillonnaires stables à leur naissance et constater que la limite extérieure correspondait à un maximum de la vitesse, la limite intérieure à un minimum, que la pression à l'extérieur était plus grande qu'à l'intérieur. Le développement de ces allées tourbillonnaires dépendait des corps : plaques planes, cylindres, ogives, etc...

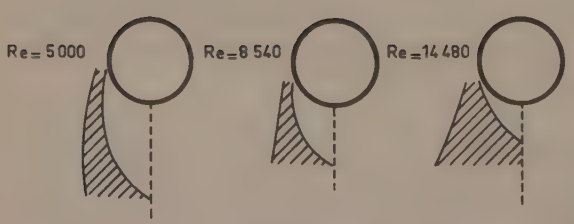


Figure I.1.3 - Développement des allées tourbillonnaires à l'aval d'un cylindre en fonction du nombre de Reynolds (d'après Schiller et Linke [5]).

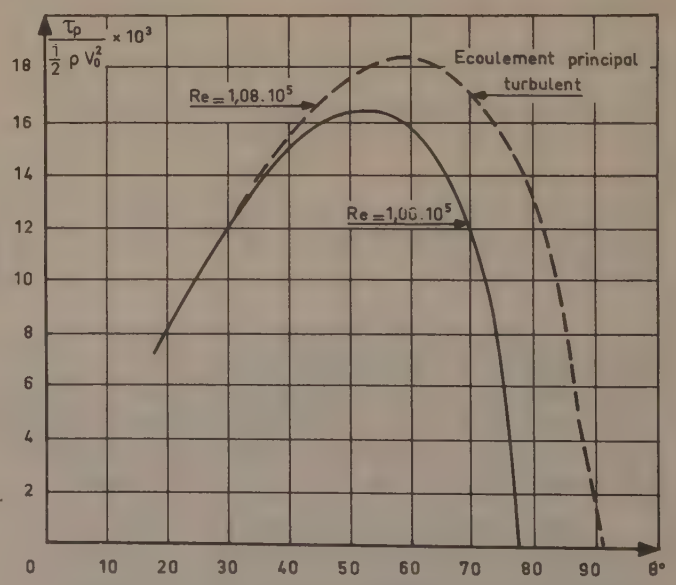


Figure I.1.4 - Tension pariétale mesurée à la paroi du cylindre (d'après Fage et Falkner [3]).

Schiller et Linke [5] ont poursuivi ce travail et ont étudié surtout l'influence du nombre de Reynolds. La figure I.1.3 donne une idée de leurs résultats.

Les mesures faites directement à la paroi du cylindre sont également très intéressantes. Fage et Falkner [3] ont utilisé des prises de pression totale à la surface même d'un tube de dimensions importantes (environ 15 cm de diamètre) pour mesurer la tension pariétale (voir figure I.1.4). Ils ont pu situer de cette manière le point de décollement de façon précise et constater qu'il se déplaçait vers l'aval lorsque l'on rendait turbulent l'écoulement principal, par exemple avec des grillages.

I.1.3 - LES MESURES DANS LE SILLAGE ÉLOIGNÉ.

Schlichting [6] a fait des mesures très précises en utilisant un tube de Pitot et un tube de prise de pression statique dans le sillage de différents tubes placés dans la veine libre d'une soufflerie. Il a exploré ainsi des transversales situées à des distances comprises entre 5 et 125 diamètres de l'axe du tube. Il cherchait à vérifier expérimentalement les résultats d'une théorie de la diffusion turbulente. La comparaison s'est révélée extrêmement satisfaisante au-delà d'une distance de 25 à 30 diamètres du tube. Schlichting explique ce phénomène en invoquant la non validité des mesures de pression statique : lorsque la vitesse n'est pas suffisamment stable ou qu'il existe un gradient de vitesse important, on ne peut espérer faire une mesure valable de la pression avec un tube de pression statique classique.

Fage et Falkner [7] ont également fait des mesures dans le sillage éloigné d'un cylindre. Cette fois, le corps était chauffé. Ils ont donc mesuré la vitesse de la même manière que Schlichting et la température à l'aide d'un thermocouple de très petites dimensions. Ils ont pu ramener ces mesures à un profil "universel". Là encore, ils ont exploré le sillage à des distances supérieures à 30 diamètres.

Il existe donc une zone relativement importante où les mesures sont très difficiles et leur interprétation délicate : de 0 à 30 diamètres derrière le cylindre.

I.1.4 - LES MESURES DANS LE SILLAGE PROCHE.

Roshko [8] a essayé de faire des mesures dans la région du sillage proche de l'arrière du cylindre. Tout d'abord, il a tenté d'évaluer la pression d'une manière originale : lorsqu'on observe la courbe donnant la pression à la surface d'un cylindre circulaire, on remarque que la pression est égale à la pression du fluide non perturbé à une distance angulaire de 35° comptée à partir du point d'arrêt. A partir de là, Roshko a placé dans le sillage des corps étudiés, un cylindre de faible diamètre comportant un trou de prise de pression. En faisant tourner ce cylindre autour de son axe, il pouvait observer un maximum de pression pour une orientation déterminée. Considérant que la prise de pression était justement à l'endroit du point d'arrêt, il faisait ensuite tourner son cylindre de 35° pour mesurer la pression dans le sillage. La figure I.1.5 présente la courbe ainsi obtenue qui peut servir de support à une théorie du sillage (voir plus loin § I.2.3).

Une autre mesure que Roshko a pu faire dans cette zone de sillage est celle de la fréquence de détachement des tourbillons, au moyen d'un anémomètre à fil chaud. A partir de cette fréquence on peut former un nombre adimensionnel :

$S = \frac{N.D}{V_0}$ appelé nombre de Strouhal, qui ne dépend que du nombre de Reynolds de l'écoulement pour un corps donné. Roshko a étudié les sillages de différents corps et a formé les nombres Re^* et S^* à partir des grandeurs caractéristiques du sillage et non du corps lui-même. Ainsi il peut trouver une loi $S^* = f(Re^*)$ valable pour tous les corps,

généralisant les études des allées tourbillonnaires de Benard-Karmann qui ne sont observables qu'à des nombres de Reynolds relativement bas. La fréquence N intervenant pour la détermination du nombre de Strouhal est alors la fréquence prédominante du spectre de turbulence observé dans la région proche du cylindre.

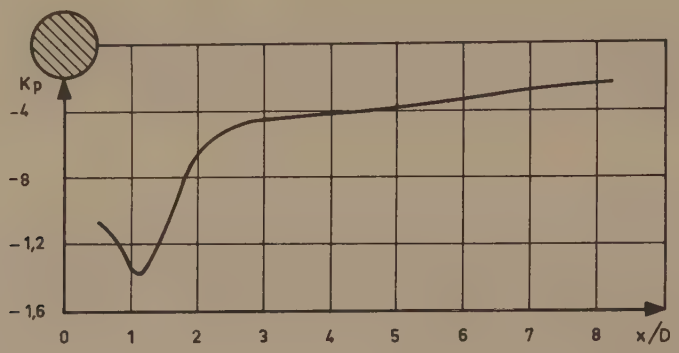


Figure I.1.5 - Pression mesurée dans le sillage d'un cylindre circulaire d'après Roshko [8] (Re = 14 500).

Chapitre II

Études théoriques sur l'écoulement autour d'un cylindre

I.2.1 - REMARQUES PRÉLIMINAIRES.

Lorsque l'on étudie l'écoulement autour d'un corps fuselé, une méthode intéressante consiste à calculer l'écoulement en fluide parfait et, à partir de la distribution de vitesse obtenue, à faire un calcul de couche-limite. Ensuite on applique le même calcul à l'obstacle "engraissé" de l'épaisseur de déplacement calculé de cette manière. On corrige ainsi la distribution de vitesse et l'on pourra obtenir après une ou deux itérations des grandeurs proches des grandeurs mesurées.

Malheureusement, pour le cylindre comme pour la plupart des corps réels, il y a décollement et sillage. La théorie de l'écoulement potentiel est impuissante à décrire ce phénomène. Dans ce cas, inutile de s'appuyer sur un calcul de couche-limite pour corriger l'écoulement : l'action du sillage est prépondérante. Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différentes théories mises au point pour tenir compte de l'effet du sillage. On verra bien vite que l'on est obligé de tenir compte des résultats expérimentaux et qu'on ne peut prévoir la forme du sillage uniquement à partir de considérations théoriques. En effet, on ne peut appliquer les lois classiques qu'à l'écoulement extérieur au sillage.

I.2.2 - LA SOLUTION DE HELMHOLTZ-KIRCHHOFF.

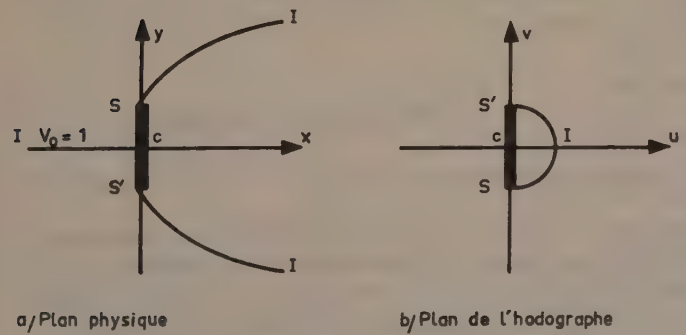


Figure I.2.1 - Schéma de calcul de la théorie de Kirchhoff.

Kirchhoff a étudié le problème de la plaque plane disposée normalement à la vitesse V_0 en faisant l'hypothèse principale suivante : la zone du sillage est limitée par une ligne de courant. Il a supposé de plus que la vitesse était constante sur cette ligne de courant, ce qui conduit au schéma indiqué sur la figure I.2.1. Le problème est ensuite résolu par une série de tranformations conformes. Le résultat final n'est cependant pas un reflet fidèle de la réalité. Le coefficient de pression K_p est nul dans le sillage : le coefficient de traînée C_x, dû uniquement à une suppression à l'avant de la plaque, est égal à 0,88 alors que dans la réalité on mesure des coefficients de l'ordre de 2.

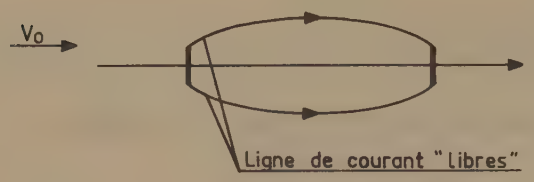


Figure I.2.2 - Hypothèse de Riabouchinsky.

Riabouchinsky [10] a modifié ce schéma de calcul justement pour essayer de tenir compte de ce coefficient de pression à l'arrière de la plaque. Il introduit une deuxième plaque à l'aval de la première et considère l'écoulement autour de ces deux plaques dont les bords sont joints par des lignes de courant "libre" (voir figure I.2.2) : l'espace limité par ces lignes de courant est supposé à pression constante. Le coefficient K_p ainsi défini est fonction de l'éloignement des deux plaques. Pour représenter de façon approximative l'écoulement réel, Riabouchinski trouve que les deux plaques doivent être éloignées de 18 fois leur largeur environ.

I.2.3 - LES TRAVAUX DE A. ROSHKO [9].

Après avoir étudié les résultats expérimentaux relatifs aux sillages (voir I.1.4). Roshko a essayé d'adopter la méthode de Kirchoff pour la rendre conforme à ces résultats en faisant les deux hypothèses suivantes :

- il existe deux lignes de courant "libres"
- la vitesse sur ces deux lignes de courant est constante et égale à $k V_0$ ($k = \sqrt{1 - K_p} > 1$) jusqu'à ce que la vitesse soit parallèle à V_0 : elle devient alors égale à V_0 en grandeur et direction.

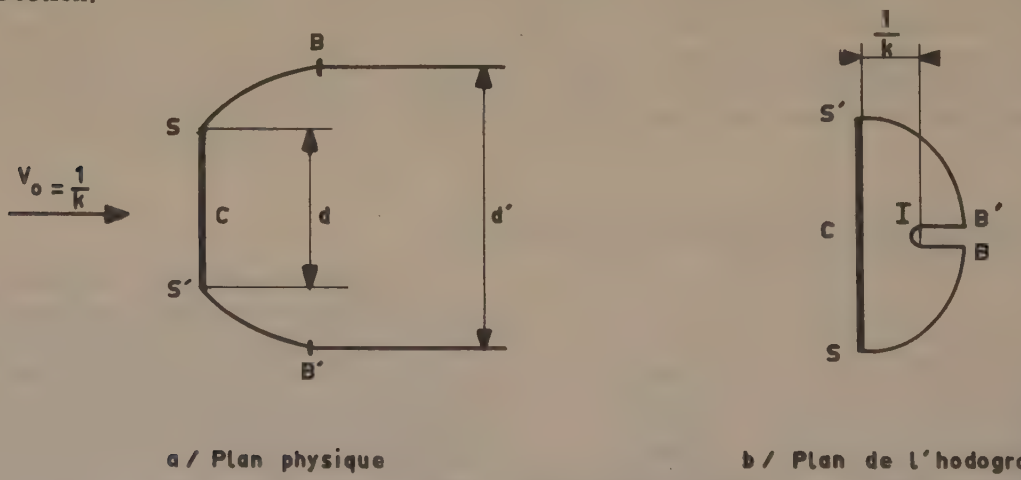


Figure I.2.3 - Hypothèses de Roshko.

Ces deux hypothèses sont représentées sur la figure I.2.3. On peut alors résoudre le problème par une suite de transformations conformes ; les résultats sont donnés en fonction d'un paramètre : k. En particulier, la distribution de pression sur la face avant de la plaque plane est très proche des résultats expérimentaux : les lignes de courant passent bien dans la zone de formation des tourbillons telle que l'avaient détectée Fage et Johansen [4].

Cette méthode est plus difficilement applicable au cylindre. Un problème important est celui de la séparation dont on ne connaît pas l'emplacement *a priori*. Pour cela, Roshko

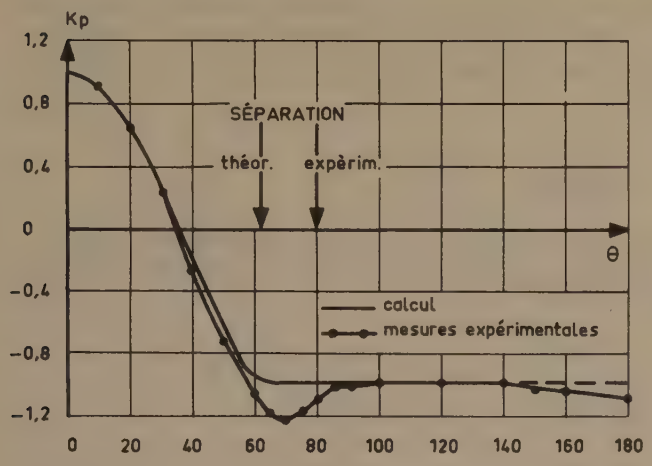


Figure I.2.4 - Pression à la surface d'un cylindre (Re = 14 500, k = 1,4).

fait une hypothèse supplémentaire : la ligne de courant, issue de ce point, est tangente au cylindre. Alors, en imposant la valeur de k, on impose automatiquement le point de décollement. On peut voir sur la figure I.2.4, les résultats obtenus : l'hypothèse sur le point de décollement n'est pas très valable pour trois raisons :

- le point de décollement théorique est éloigné du point mesuré ;

- le décollement a lieu, selon cette théorie, à un endroit où le gradient de pression est négatif, ce qui est physiquement inadmissible ;

- il peut arriver que le décollement ait lieu pour $\theta > 90°$. Dans ce cas les hypothèses du calcul ne sont plus valables.

I.2.4 - AUTRES THÉORIES DU SILLAGE.

Les différentes théories du sillage exposées jusqu'à présent n'ont pas donné complètement satisfaction. Aussi a-t-on recherché des schémas de plus en plus compliqués susceptibles de cerner plus étroitement les réalités physiques. La méthode de Woods [11], appliquée au cylindre circulaire, donne des résultats particulièrement intéressants. Nous n'exposerons pas ici de façon détaillée la méthode de calcul utilisée. Disons simplement que Woods se ramène à la résolution d'une équation $\Delta f = 0$ par des changements de fonctions et de variables successifs avec des conditions aux limites assez simples (grâce à des transformations conformes).

Il est plus intéressant de voir quelles sont les hypothèses faites au départ. Woods suppose connue la position des points de décollement, ainsi que la valeur expérimentale du coefficient K_p à cet endroit. Il montre d'ailleurs que la forme du contour *avant le décollement* n'a plus d'importance (à condition de conserver le même K_p). Il peut ainsi calculer les lignes de courant "libres" issues des points de décollement qui n'ont pas toujours de réalité physique (figure I.2.5). Dans le cas I, les lignes de courant pénètrent le corps : dans le cas II, elles se croisent en aval. On trouve ainsi que les points de décollement doivent nécessairement être situés en aval des points S et en amont des points P. Ces points sont parfaitement déterminés. Pour un cylindre circulaire, ces points sont à 55° et 124° du point d'arrêt. Woods impose donc une condition supplémentaire pour fixer la position du point de décollement : les lignes de courant doivent tendre à devenir parallèles et rester à distance finie l'une de l'autre lorsque l'on s'éloigne indéfiniment vers l'aval. Avec cette condition, on trouve, par exemple, le point de décollement pour le cylindre circulaire à $\theta = 76°$, ce qui est proche de la valeur expérimentale. On peut voir sur la figure I.2.6, les résultats obtenus par Woods.

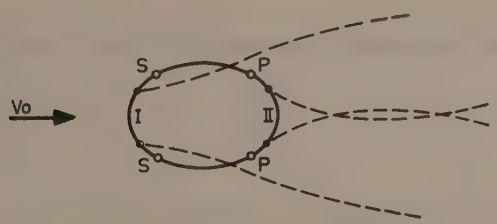


Figure I.2.5 - Deux cas où les lignes de courant "libres" dans la théorie de L.C. Woods n'ont pas de réalité physique.

Il faut signaler également les résultats de Wu [12] concernant d'ailleurs surtout la plaque plane inclinée. Il sépare le sillage en deux régions : le sillage "proche" à pression constante et le sillage "éloigné" où la pression augmente de façon régulière jusqu'à atteindre p_o à l'infini.

I.2.5 - RECHERCHES SUR LA FORME DU SILLAGE.

Les méthodes exposées précédemment cherchaient à calculer l'écoulement et en particulier les lignes de courant limite du sillage à partir d'hypothèses sur les conditions de pression à l'intérieur même du sillage.

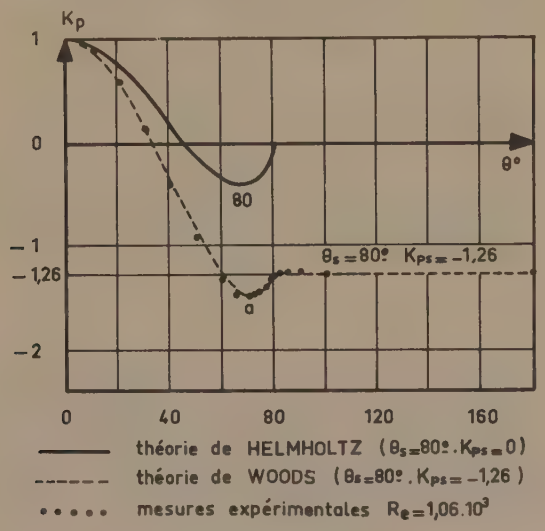


Figure I.2.6 - Résultats de Woods pour le cylindre circulaire.

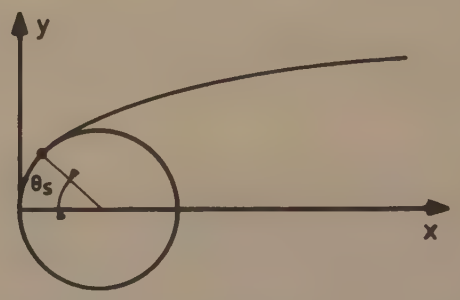


Figure I.2.7 - Contours essayés par Grove [14].

Acrivos et al [13], de même que Grove [14], ont recherché des corps fictifs tels que l'écoulement potentiel autour de ces corps engendre une distribution de pression proche de celle observée dans la réalité. Les contours essayés avaient pour équation : $y = W - a(x + b)^{-n}$ (notations figure 1.2.7), W, a, b sont trois paramètres que l'on ajuste de manière à ce que le contour ait même rayon de courbure que le cylindre au point de décollement.

On peut voir certains résultats obtenus sur la figure 1.2.8. La courbe ($n = 2$, $\theta_s = 45°$) est très proche de la courbe expérimentale pour des nombres de Reynolds faibles (200 environ).

I.2.6 - CONCLUSIONS.

Les diverses théories du sillage exposées précédemment sont intéressantes en ce sens qu'elles tendent à cerner une réalité physique par le calcul et dans certains cas les résultats paraissent encourageants. Elles comportent cependant des défauts très graves.

Tout d'abord, s'il est plausible de supposer que l'écoulement est parfait à l'extérieur de la zone du sillage, il n'est pas possible de le faire pour la région du sillage. Or c'est ce qui est admis implicitement dans toutes les théories (sauf pour celles de Woods et Wu) lorsqu'on prend pour limite du sillage une ligne de courant.

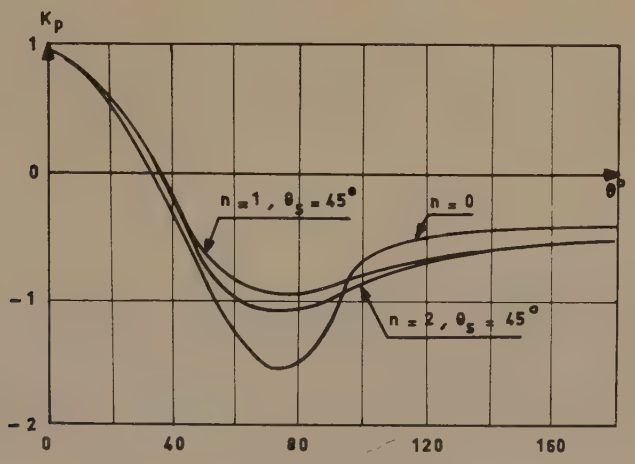


Figure I.2.8 - Pression calculée à la surface du cylindre d'après [13].

D'autre part l'aspect instabilité du sillage a été totalement négligé. Pour rendre compte des caractéristiques physiques du sillage on ne peut plus se limiter à des écoulements stationnaires : la variable temps doit intervenir. Quelques tentatives dans cette direction ont donné des résultats encourageants. Fromm [41] notamment a pu intégrer numériquement les équations de Navier pour des phénomènes non stationnaires et retrouver par le calcul les instabilités physiques observées dans les sillages.

Chapitre III

Études concernant les faisceaux tubulaires

Les échangeurs à faisceau tubulaire ayant pris une importance considérable avec le développement des grands générateurs de vapeur, des études expérimentales ont été effectuées en grand nombre pour tester les avantages et les inconvénients de certaines dispositions, mais surtout pour permettre des calculs relativement précis des surfaces d'échange. Nous présentons dans le premier paragraphe un certain nombre de ces études en insistant particulièrement sur les méthodes employées.

Les études à caractère fondamental concernant la structure même de l'écoulement sont plus rares. Elles se sont imposées à la suite d'incidents de fonctionnement (vibrations dans les faisceaux) ou encore de tentatives de regroupement des résultats expérimentaux épars.

I.3.1 - ÉTUDES À CARACTÈRE EXPÉRIMENTAL CONCERNANT LE FONCTIONNEMENT GLOBAL DES ÉCHANGEURS.

Les premiers travaux expérimentaux de grande envergure concernant les échangeurs à faisceau tubulaire sont ceux de Pierson [15] et Huge [16] dont les résultats ont été utilisés par Grimison [17] pour mettre au point des formules dont la validité est toujours reconnue actuellement. Les faisceaux étudiés étaient de petites dimensions, mais l'installation pouvait être mise sous pression et permettait de grands nombres de Reynolds. Les tubes étaient chauffés par des résistances électriques. Le fluide utilisé était de l'air.

- Des essais complémentaires ont été effectués plus tard, notamment par Bergelin [18] pour explorer d'autres régimes d'écoulement : écoulements visqueux et transitoires. Il essaie notamment d'adapter les formules de Grimison pour tenir compte de la viscosité.

- Une autre méthode de recherches est mise au point par London [19] pour explorer les faisceaux. Après avoir chauffé un tube constitué par un métal très conducteur, on mesure son taux de refroidissement et l'on en déduit son coefficient de transfert de chaleur individuel. La méthode est simple, mais nécessite quelques précautions. En particulier, elle est valable surtout pour des faisceaux de tubes en quinconce et des dispositions inhabituelles. Les résultats publiés dans [20] coïncident très bien avec ceux de Grimison. Un banc d'essais systématiques pour les échangeurs a été mis en place en France, utilisant cette méthode [21].

Il faut également citer une série d'essais effectués à la "Cornell University" sur des faisceaux de tubes "en ligne" ([22], [23], [24]). Les échangeurs étaient formés par des rangées individuelles de 10 tubes accolées. On étudiait systématiquement le transfert de chaque rangée pour voir l'influence des rangées précédentes. Les résultats sont très intéressants, notamment pour les nombres de Reynolds élevés. A partir d'une certaine limite, les échangeurs devenaient "musicaux" en émettant des vibrations acoustiques puissantes. Les grandeurs caractéristiques : pertes de pression et coefficients de transfert subissaient alors des variations inhabituelles.

Les résultats de ces essais sont exprimés généralement sous la forme de relations entre nombres adimensionnels. Pour exprimer le transfert on trouve généralement :

$$Nu = \varphi(Re)$$

ou encore

$$St \times Pr^{2/3} = \varphi(Re)$$

Le nombre de Nusselt Nu est alors défini par $Nu = \frac{h.D}{\lambda}$, h étant le coefficient de transfert moyen (que l'on peut appliquer à l'ensemble de la surface d'échange). Le nombre de Stanton St est défini par $St = \frac{h}{\rho V cp}$; ρV est alors la vitesse massique dans la section contractée de l'échangeur.

Pour exprimer la perte de charge on trouve généralement des relations de la forme :

$$f = \varphi(Re)$$

f étant défini par

$$f = \Delta p \Big/ \frac{1}{2} \frac{(\rho V)^2}{\rho} \frac{A}{A_c}$$

A, étant la surface totale d'échange et A_c la section contractée de l'échangeur, Δp étant la perte de pression due au frottement. Le nombre de Reynolds est calculé de différentes manières suivant les auteurs, ou bien à partir du diamètre des tubes, ou bien à partir d'un rayon hydraulique relatif à l'écoulement autour des tubes.

Outre la diversité des nombres adimensionnels représentatifs, le vaste choix possible des températures de référence contribue à accroître les difficultés que l'on rencontre en utilisant ces formules pour calculer un échangeur.

Un reproche fondamental que l'on peut faire à ce système est qu'il ne s'intéresse qu'à des résultats globaux : quantité de chaleur échangée, températures d'entrée et de sortie ; mais pour les obtenir, il utilise des formules "locales" : nombres de Nusselt, par exemple, que l'on moyenne, et qui ne sont valables globalement qu'en utilisant des paramètres qui n'ont plus de réalité physique : différence de température "moyenne", température de "film" etc...

1.3.2 - ÉTUDES A CARACTÈRE FONDAMENTAL.

C'est le problème des vibrations acoustiques qui obligea tout d'abord les expérimentateurs à étudier l'écoulement des gaz autour des tubes. Car on s'est rendu compte rapidement que ces vibrations ne doivent rien aux tubes eux-mêmes et sont engendrées uniquement par les gaz. Il s'agit d'un phénomène de résonance entre une fréquence propre de vibration d'une cavité : l'espace compris entre deux rangées successives pour une vibration perpendiculaire aux tubes et à l'écoulement et une fréquence d'excitation.

D'où provient cette fréquence d'excitation ? Baird [25] parle de la fréquence de détachement des tourbillons à l'arrière des cylindres isolés qui est régie par une formule du type :

$$N = 0,2 \frac{V_o}{D} \qquad \text{ou} \qquad \mathcal{S} = 0,2$$

Mais, en fait, si cette explication donne des résultats satisfaisants dans certains cas, elle n'est pas justifiée pour autant : on n'observe pas, comme pour le cylindre isolé, de tourbillons à l'arrière des tubes du faisceau. Certes on observe des fréquences privilégiées dans le spectre de turbulence de l'écoulement et l'on peut parler du nombre de Strouhal. Ces vibrations sont plutôt dues à la géométrie particulière du faisceau, comme le proposent Grotz et Arnold [26] : les particules de gaz n'ont pas un trajet rectiligne entre les files de tubes : elles finissent par avoir une trajectoire de forme sinusoïdale combinant un déplacement continu de vitesse V et un mouvement oscillatoire transversal de fréquence:

$$N = \frac{1}{2}\,\frac{V}{S_L} \quad ,$$

S_L étant l'espacement longitudinal (entre axes) des tubes. Ceci est assez bien vérifié expérimentalement.

Des résultats assez intéressants ont été publiés récemment ([27], [28], [29]), concernant l'écoulement dans des faisceaux à des nombres de Reynolds inférieurs à 10^3. Les auteurs ont pu notamment faire des mesures de vitesse assez précises dans les intervalles compris entre les tubes. Le schéma d'écoulement proposé est reproduit par la figure I.3.1 : on considère le fluide situé à l'arrière des tubes comme immobile, l'écoulement dans les "couloirs" laissés libres se faisant comme dans un canal avec des rugosités de paroi. Cependant, ce schéma reste incomplet, car il ne tient pas compte du décollement de la couche limite et de son réattachement sur le cylindre suivant. Les auteurs ont été guidés dans leurs recherches par le souci de réunir les données expérimentales existant dans la littérature par un nombre restreint de formules empiriques.

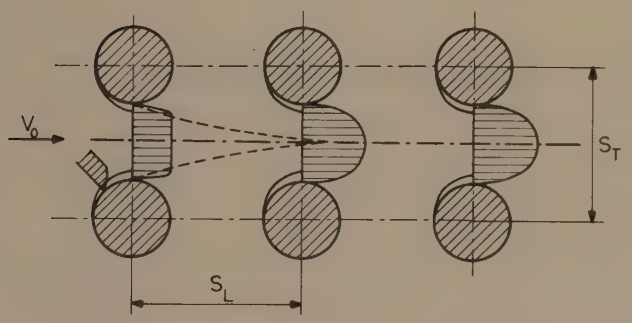


Figure I.3.1 - Schéma de l'écoulement dans un faisceau tubulaire d'après [28].

En particulier, on remarque que l'on peut prendre pour vitesse de définition du nombre de Reynolds la vitesse à l'amont (ce qui n'est guère représentatif) ou la vitesse dans la section contractée, qui, elle, dépend de la disposition des tubes. Il leur a semblé rationnel d'introduire une vitesse moyenne sur le trajet de contournement du tube. De fait, les relations $Nu = \varphi(Re)$ semblent bien être identiques pour la première rangée de chaque faisceau, quel que soit l'espacement transversal. Ces résultats semblent séduisants. Malheureusement les auteurs sont trop discrets sur la manière précise dont ils ont été obtenus pour que l'on puisse porter un jugement sur leur utilité pratique.

Deuxième partie

Mesures réalisées avec un tube isolé

Principales notations utilisées dans la deuxième partie

Théorie du fil chaud.

I - Intensité du courant électrique traversant le fil.

R - Résistance du fil chauffé.

R_a - Résistance du fil à T_a : R_o résistance à T_o.

U - Tension aux bornes du fil : U_o tension pour $V = 0$.

A, B - Coefficients de la loi de King.

a, b - Constantes.

l - Longueur du fil.

d - Diamètre du fil.

α - Coefficient de variation de R : $R/R_o = 1 + \alpha(T - T_o)$.

T, T_a - Température de l'écoulement.

T_o - Température de référence.

T_E - Température de l'eau de refroidissement.

λ, c_p, ρ - Conductivité thermique, chaleur massique à pression constante, et masse volumique du fluide à la température T_a.

Chapitre I

Dispositif expérimental

II. 1. 1. - LE CIRCUIT GÉNÉRAL.

Le circuit général est représenté par la figure II.1.1, l'air est aspiré à l'extérieur du hall d'essais au travers de filtres assez fins pour arrêter la plupart des poussières

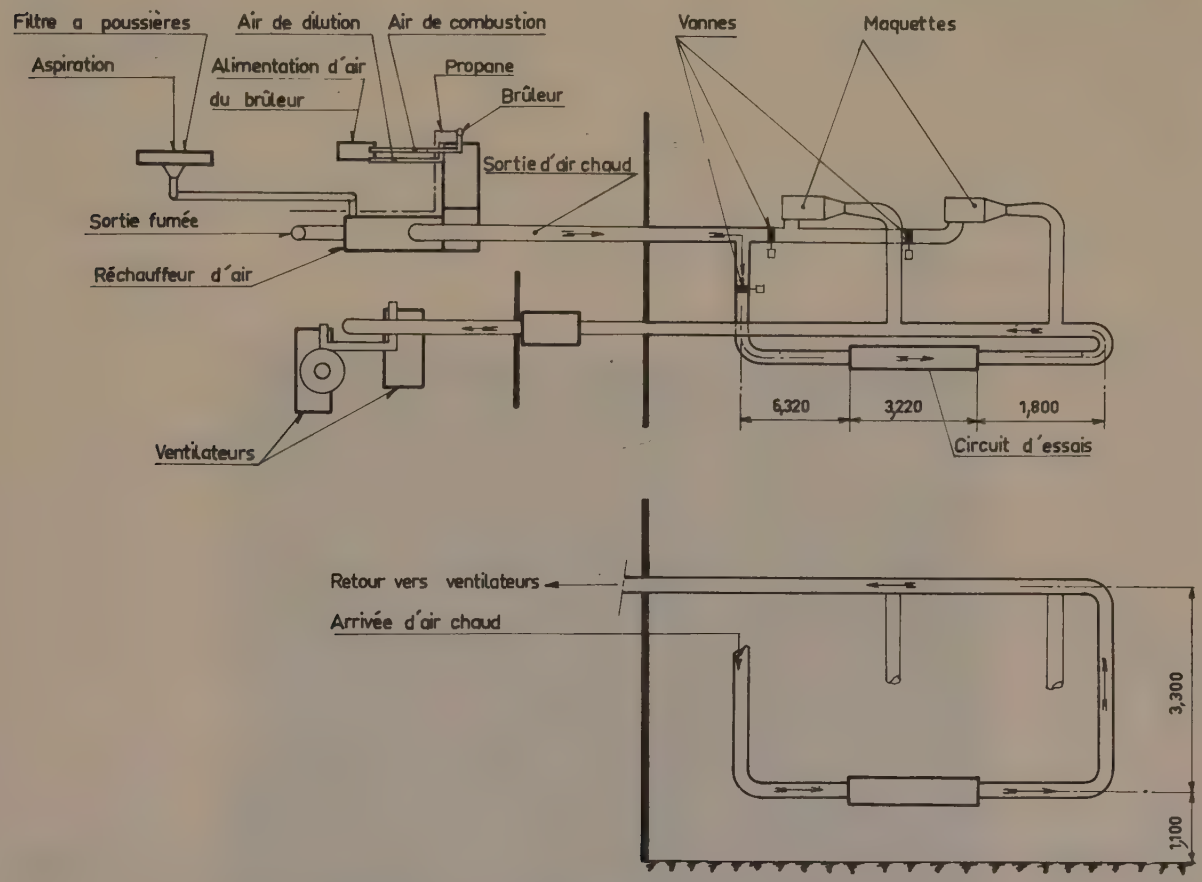


Figure II.1.1 - Implantation du circuit général.

atmosphériques. Il passe ensuite à travers un réchauffeur fonctionnant au propane (les fumées chauffent un faisceau de tubes dans lesquels circule l'air à réchauffer) : puis il est conduit dans le hall d'essais où on peut l'aiguiller vers l'un quelconque de trois cir-

cuits au moyen de vannes commandées électriquement. Un ensemble de deux ventilateurs montés en parallèle assure la circulation de l'air qui est ensuite rejeté à l'atmosphère. La température maximale que l'on peut ainsi obtenir est 500°C pour un débit de 1 kg/s. Les ventilateurs peuvent assurer une pression de 12 000 Pa pour un débit de 2 m^3/s. Cette installation a été mise en place principalement pour expérimenter des maquettes de générateurs de vapeur [30]. Accessoirement, on a branché un circuit dérivé comportant une conduite assez longue pour obtenir un écoulement suffisamment régulier. C'est dans ce circuit dérivé que l'on a pu faire les mesures que l'on va décrire.

II.1.2 - LA SECTION D'ESSAIS.

Les différentes gaines constituant le circuit général sont circulaires, de diamètre 500 mm. La veine d'essais d'échangeurs est de section carrée (400 × 400). Elle est raccordée au circuit par un convergent à la sortie duquel on a placé trois blocs de "nids d'abeilles" (diamètre de la maille 6 mm, largeur d'un bloc : 50 mm) destinés à régulariser l'écoulement. Un schéma d'ensemble de cette veine est donné par la figure II.1.2 sur lequel on peut voir l'emplacement des trous pratiqués dans la paroi permettant d'effectuer des mesures à l'amont et à l'aval de la section d'essais.

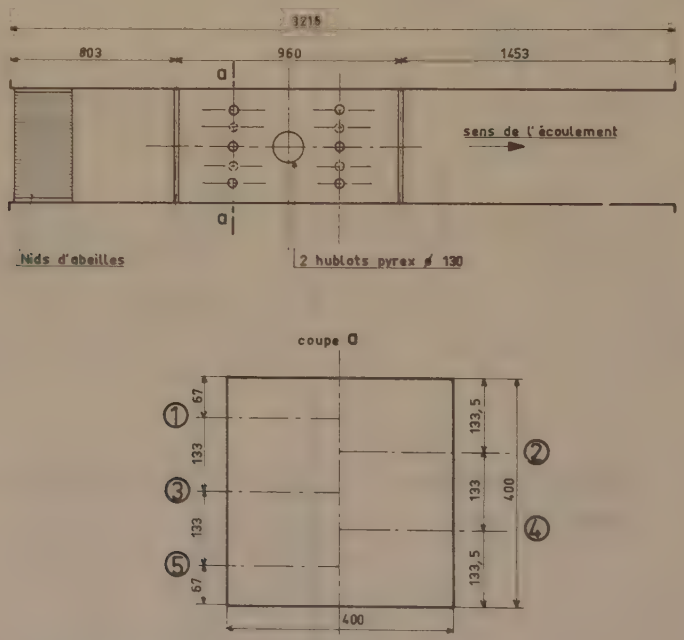


Figure II.1.2 - Schéma de la veine d'essai.

Avant de commencer les essais, on a réalisé une exploration en vitesse et température dans la gaine. Les résultats sont donnés par la figure II.1.3. Les défauts de vitesse enregistrés sont probablement dus à la présence à l'amont d'un coude à une distance trop faible de la section de mesures. La répartition n'a pas pu être améliorée en plaçant des grillages en amont des nids d'abeilles.

La figure II.1.4 montre l'aspect de la section d'essai une fois que le calorifuge est en place (épaisseur 150 mm). Deux hublots de pyrex placés de part et d'autre de la gaine

TABLEAU 1

EXPLORATION DES VITESSES
DANS LA VEINE CARREE

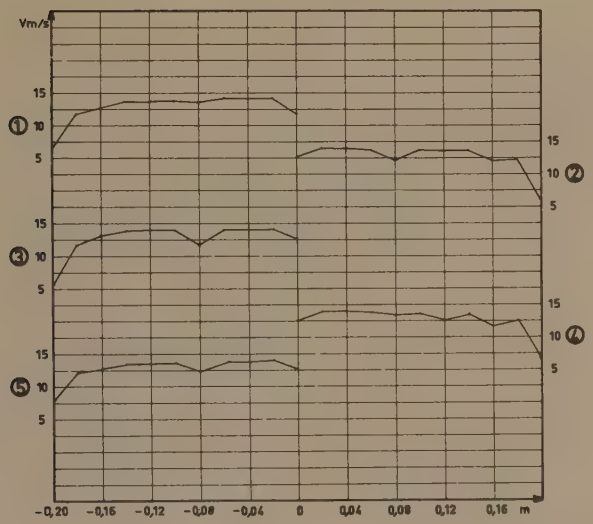


TABLEAU 2

EXPLORATION DES TEMPERATURES
DANS LA VEINE CARREE

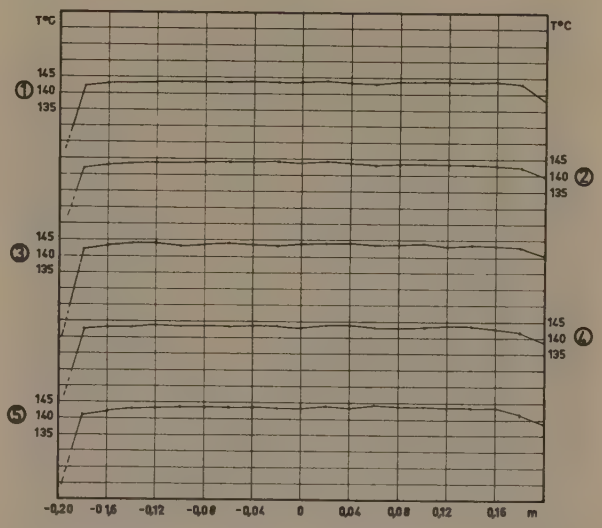


Figure II.1.3 - Répartition des vitesses et des températures dans la veine d'essai.

Figure II.1.4 - La section d'essais. On aperçoit le hublot de pyrex permettant de mesurer les distances au tube.

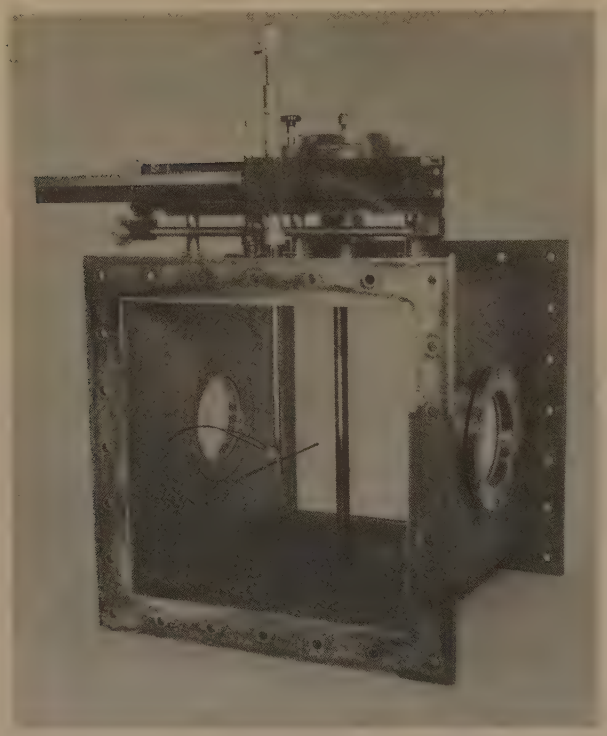


Figure II.1.5 - La partie centrale de la veine avec les deux appareils d'exploration.

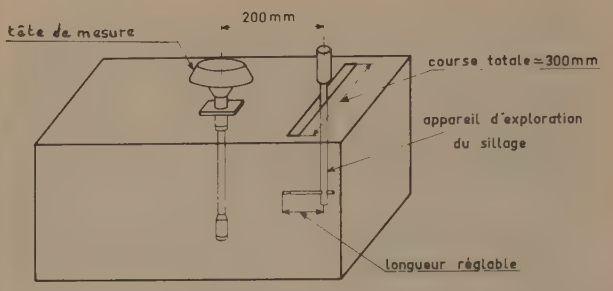


Figure II.1.6 - Position relative des deux appareils d'exploration.

permettent de faire des visées à l'aide d'un cathétomètre pour déterminer la position des sondes de mesure par rapport au tube.

II.1.3 - LES APPAREILS D'EXPLORATION.

Les deux appareils d'exploration mis au point pour l'étude de l'écoulement autour du cylindre sont représentés sur les figures II.1.5 et II.1.6. Le premier destiné à la région proche du cylindre a été étudié surtout en vue de l'échangeur "cent tubes". Il fallait un appareil adaptable à l'échangeur et un certain nombre de problèmes était à résoudre :

- comment déplacer une sonde dans un espace restreint ;
- comment alimenter en eau le tube ;
- comment mettre en place et sortir facilement ce tube porte-sondes.

Ces problèmes ont été résolus par un premier modèle (figures II.1.7 et II.1.8) et l'on s'est attaché au cours des études suivantes à perfectionner le système par quelques modifications qui furent réalisées sur l'échangeur définitif.

Le système de déplacement a été conçu de manière à balayer un espace assez grand sans être gêné par les tubes voisins dans un échangeur : deux rotations autour de deux

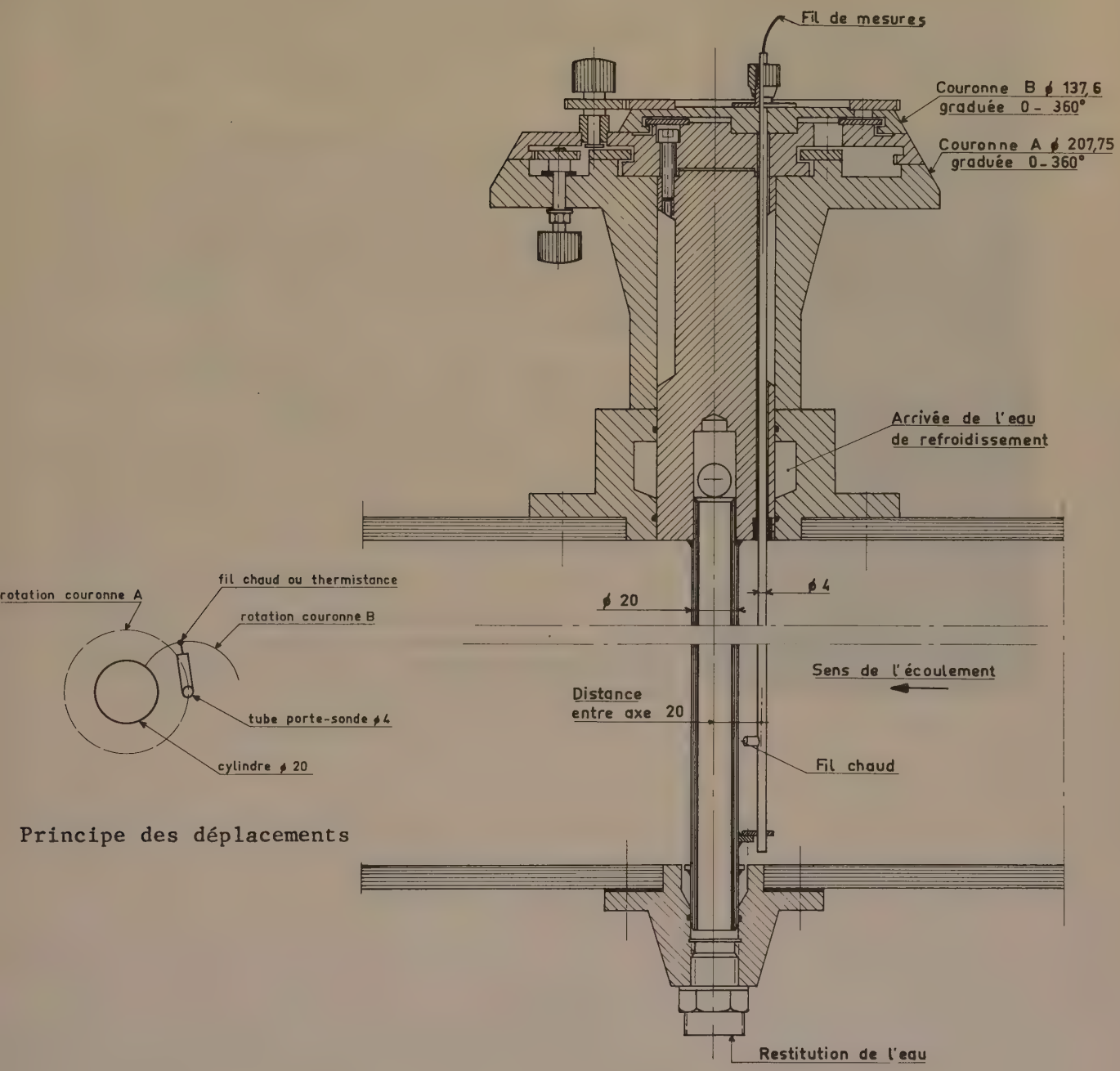


Figure II.1.7 - Détails de construction de l'appareil d'exploration.

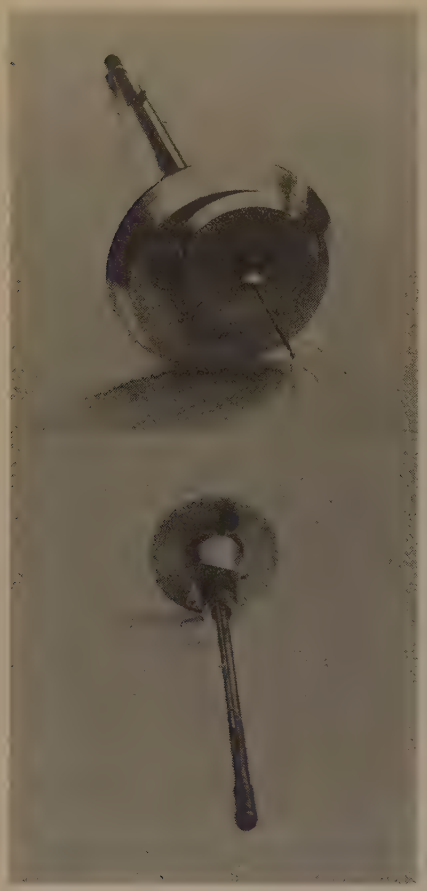


Figure II. 1. 8

axes distants de 20 mm. Il faut donc dans ce cas prévoir des sondes qui ne soient pas sensibles à la direction de la vitesse. L'étanchéité de l'alimentation en eau a été assurée par des joints toriques permettant cependant facilement la rotation de l'ensemble du tube ainsi que le retrait de la tête complète.

Les deux couronnes commandant les rotations sont munies d'un vernier permettant une mesure à 10' près. Les distances de la sonde aux deux axes sont de l'ordre de 25 mm. La position de celle-ci est donc connue environ à 0,1 mm près, à condition que les axes soient bien rectilignes. En fait l'axe matérialisé par le tube porte-sonde (⌀ 4 mm) manquait de rigidité. Pour la tête de mesure construite ultérieurement, on a dû prévoir un guidage plus efficace dans la partie inférieure.

L'appareil destiné à l'exploration du sillage n'a été prévu qu'accessoirement : il ne devait pas être utilisé dans l'étude de l'échangeur "cent tubes". Il a permis d'analyser la validité des méthodes de mesure dans un écoulement fortement perturbé. On peut en voir un croquis sur la figure II.1.9. Il a fallu trouver un système permettant de retirer facilement les sondes pour pouvoir explorer successivement plusieurs transversales à différentes distances de l'arrière du tube. Le support de l'ensemble sonde + porte-sondes permettait à ce dernier une rotation de 90° autour d'un axe vertical. De cette manière, on pouvait ensuite retirer l'ensemble en passant dans la rainure ménagée dans la gaine. Une règle graduée munie d'un vernier permet de mesurer les déplacements transversaux à 0,1 mm près.

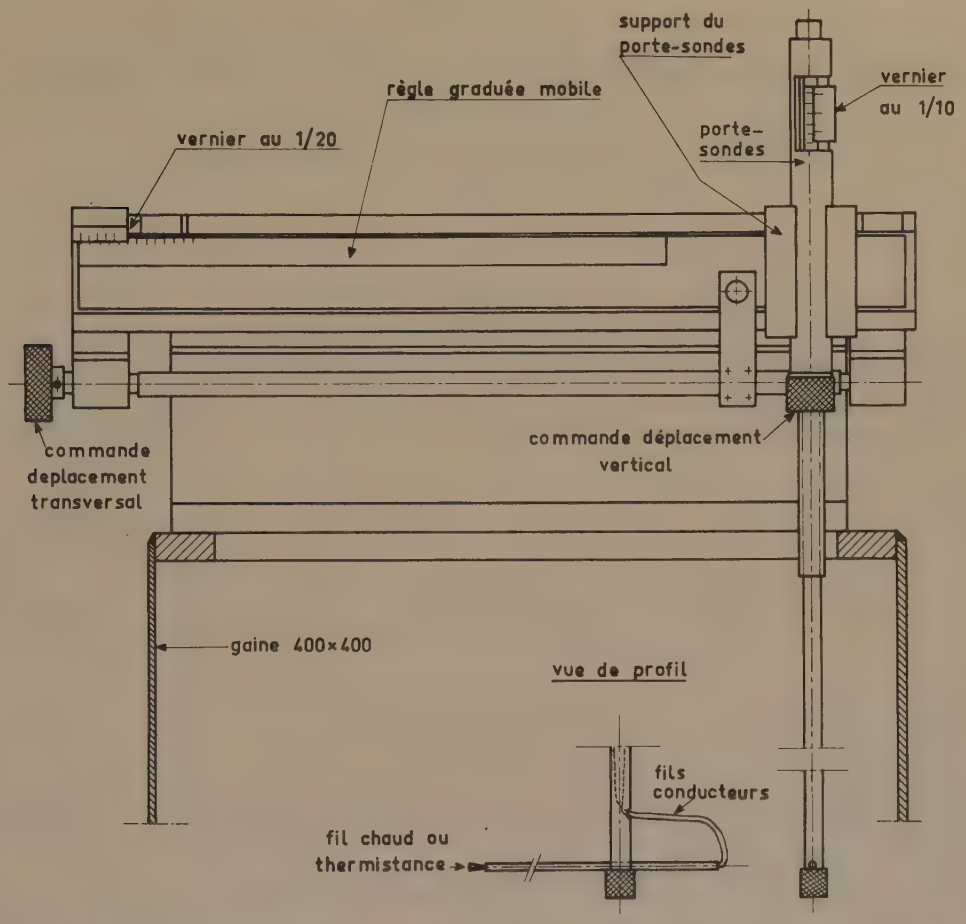


Figure II.1.9 - Appareil d'exploration du sillage du cylindre isolé.

Chapitre II

Mesures dans le sillage à l'aide d'un anémomètre à fil chaud à intensité constante

On a vu précédemment qu'il était nécessaire d'avoir des sondes peu sensibles à la direction de la vitesse (dans un écoulement bidimensionnel). Or le fil chaud répond parfaitement à cette exigence à condition qu'il soit bien perpendiculaire au plan de la vitesse. Il était normal d'étudier les possibilités offertes par cette méthode de mesure.

II.2.1 - THÉORIE DU FIL CHAUD POUR LA MESURE DES VITESSES ET TEMPÉRATURES MOYENNES.

Pour mesurer la température, il suffit d'utiliser le fil chaud comme un thermomètre à résistance. Le coefficient α défini par la relation :

$$\frac{R_a}{R_o} = 1 + \alpha\ (T_a - T_o)$$

est de l'ordre de 39.10^{-4} pour le platine et avec un certain nombre de précautions on peut espérer une bonne précision (on reviendra sur ce problème par la suite - voir également à ce sujet [31]).

Une fois connue la température de l'écoulement, on pourra utiliser la loi de King pour mesurer la vitesse :

$$\frac{I^2 R}{R - R_a} = A + B\ \sqrt{V}$$

Les coefficients A et B dépendent de la température. King [32] leur donne pour expression :

$$A = a\ \frac{l}{R_o \alpha}\ \lambda$$

$$B = b\ \frac{l}{R_o \alpha}\ \sqrt{d c_p \rho \lambda}$$

S. Corrsin [33] a étudié les variations de ces coefficients à partir des variations des caractéristiques physiques du fluide (en particulier pour l'air). On pourrait également tenir compte des variations de l et d mais, le coefficient de dilatation linéaire du platine étant de l'ordre de 10^{-4} m/m.deg., cela engendre pour A et B des variations négligeables dans un intervalle de température restreint. En partant des lois suivantes :

$$\frac{\rho}{\rho_o} = \frac{T_o}{T_a}$$

$$c_p = C^{te}$$

$$\frac{k}{k_o} = \frac{T_o + 125}{T_a + 125} \left(\frac{T_a}{T_o}\right)^{3/2}$$

On obtient les résultats ci-dessous :

$$\frac{A}{A_o} = \frac{T_a + 125}{T_o + 125} \left(\frac{T_a}{T_o}\right)^{3/2}$$ A croît quand T croît.

$$\frac{B}{B_o} = \frac{T_o + 125}{T_a + 125} \left(\frac{T_a}{T_r}\right)^{1/2}$$ B décroît quand T croît.

La variation de A est assez importante alors que celle de B est faible. Corrsin [33], ne pouvant réaliser différents étalonnages d'un même fil à des températures différentes, a supposé exacte la loi de variation de B et a déduit celle de A des mesures effectuées. Il l'a trouvée en bon accord avec la théorie pour une gamme de température assez importante : 0°C à 450°C.

Par la suite [34], il a eu la possibilité d'effectuer une série d'étalonnages isothermes et a pu trouver que les erreurs expérimentales masquaient largement les variations éventuelles de B avec la température. On peut donc estimer en première approximation que ce coefficient reste constant.

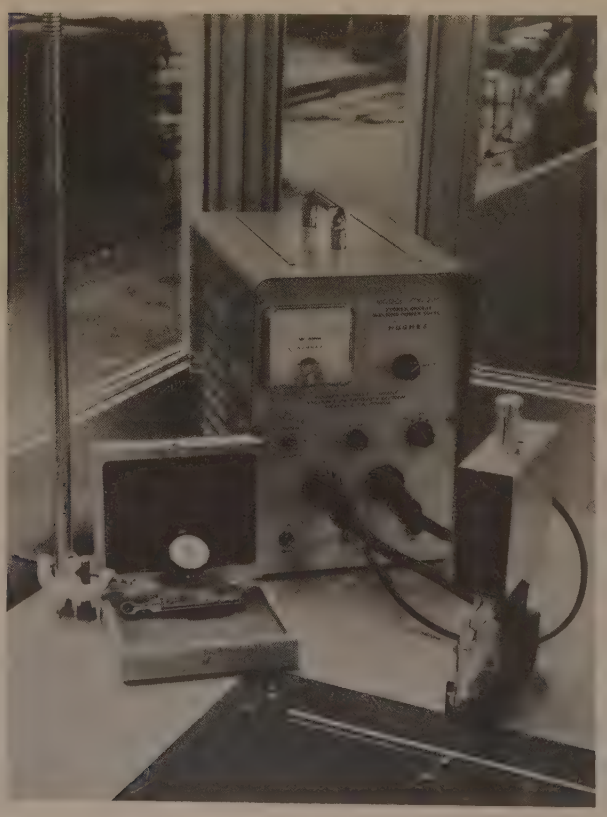


Figure II.2.1 - Le poste de soudure.

Pour cette étude, les températures de l'écoulement dans le sillage du tube cylindrique se situent effectivement entre 180°C et 150°C. Les variations théoriques de A, d'après l'étude de Corrsin sont de l'ordre de 1 à 2 %. Nous les négligerons, car les erreurs expérimentales sont du même ordre. Il suffira d'effectuer l'étalonnage dans le même intervalle de température. Seules les variations de R_a interviendront dans la loi de vitesse.

II.2.2 - RÉALISATION PRATIQUE DES FILS CHAUDS.

Nous avons tout d'abord dû réaliser des sondes pouvant supporter des températures inférieures à 250°C environ. Le corps de la sonde est constitué par un tube d'acier inoxydable de diamètres 3 et 4 mm. A l'intérieur, les conducteurs en cuivre sont isolés et maintenus par des perles bifilaires en porcelaine : à chaque extrémité, un bouchon de ciment spécial isolant empêche tout mouvement des perles à l'intérieur du tube.

Le fil chaud lui-même a été réalisé avec du "wollaston" dont l'âme de platine a un diamètre de 0,004 mm et la gaine d'argent 0,04 mm. La fixation du fil sur ses supports ne pouvant être faite avec

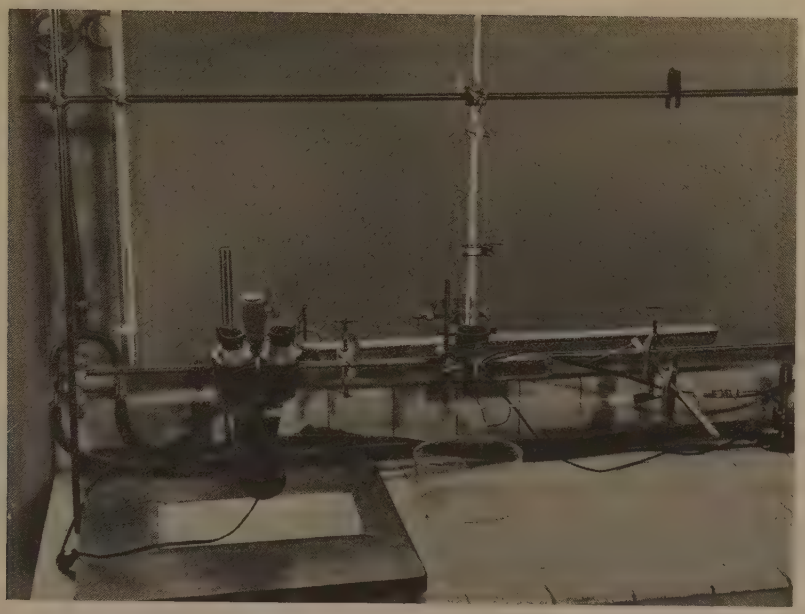


Figure II.2.2 - Installation de décapage des fils chauds.

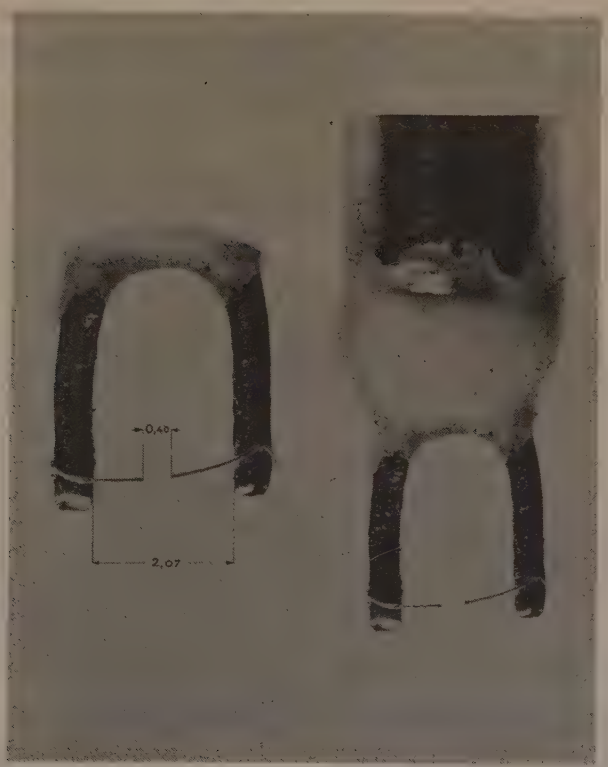


Figure II.2.3 - Le fil chaud.

une soudure à l'étain (risque de dégradation de cette soudure à des températures supérieures à 230°C environ), on a utilisé une soudeuse électrique (figure II.2.1). Les résultats ont été extrêmement satisfaisants. Après quelques tâtonnements pour rechercher les valeurs de la pression et de la puissance électrique à utiliser, on réalisait facilement de nombreuses soudures sans risque de décollage ou au contraire de casse du fil (par suite d'un écrasement excessif).

Le décapage du fil de wollaston, opération maintenant classique, fut réalisé à l'aide de l'installation reproduite sur la figure II.2.2. On a utilisé une pipette en pyrex dont l'extrémité était formée par un tube de platine de diamètre intérieur 0,3 mm. La réaction chimique (attaque de l'argent par de l'acide nitrique dilué à 1 %) était accélérée par le passage d'un courant électrique d'intensité constante de 1 mA. Une minuterie limitait le passage du courant à 25 ou 30 secondes, ce qui permettait d'avoir des fils nets (voir figure II.2.3).

Pour "stabiliser" les caractéristiques du fil et en particulier sa résistance et le coefficient α, on a été obligé de lui faire subir un "recuit", comme le propose Taccoen [31]. Après le décapage, on porte le fil au rouge en le chauffant par un courant électrique de l'ordre de 30 à 40 mA (le rouge est apprécié à l'oeil à travers une loupe binoculaire à fort grossissement) pendant un temps de l'ordre de 30 secondes. On a trouvé que ceci améliorait beaucoup la stabilité du coefficient α.

II.2.3 - RÉALISATION DES MESURES - ÉTALONNAGE DES FILS.

Pour pouvoir appliquer la loi de King, on doit connaître d'abord la température ou plutôt la résistance R_a. On mesurera cette résistance en faisant passer dans le fil un courant électrique de faible intensité et en mesurant la différence de potentiel aux bornes de la sonde. Pour mesurer la vitesse, on alimentera le fil avec un courant d'intensité plus importante.

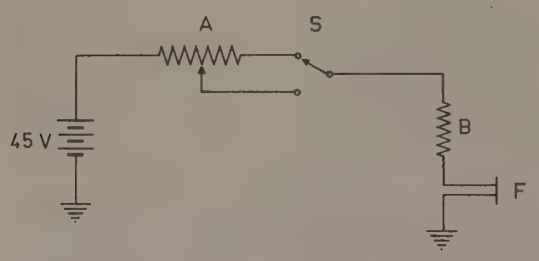


Figure II.2.4 - Schéma de fonctionnement de l'anémomètre. A - résistance ajustable de grande valeur ; S - sélecteurs ; B - résistance de précision (4Ω) ; F - fil chaud.

L'appareil utilisé est un anémomètre "à intensité constante", commercialisé par "Flow Corporation", auquel on a apporté certaines modifications pour pouvoir automatiser les mesures. Le schéma de principe est présenté sur la figure II.2.4. Une batterie de 45 volts alimente en série une résistance de grande valeur A, une résistance de précision B et le fil chaud. Un sélecteur permet de réduire la valeur de A de manière à faire passer dans le fil un courant de 1 mA environ (courant faible pour la mesure de la résistance R_a du fil) ou un courant plus important (30 à 40 mA pour le fonctionnement en anémomètre). On connaîtra l'intensité et la tension du courant traversant le fil en mesurant la tension aux bornes de B et de F. Ces tensions ont les ordres de grandeur ci-dessous :

	B	F
courant faible	4 à 10 mV	4 à 10 mV
courant fort	100 à 200 mV	1 V

Pour mesurer ces tensions, on dispose d'une centrale de mesures statique à commutateur unifilaire (100 voies maximum) dotée d'un convertisseur tension-fréquence d'une sensibilité maximale de 100 mV pleine échelle. Chacune des voies est munie d'un diviseur de tension permettant de mesurer des tensions supérieures à 100 mV (rapports 10, 100, 1000). On a donc été obligé de prévoir deux amplificateurs différentiels à courant continu dont le rôle est d'amplifier les valeurs mesurées dans le rapport 10 et d'isoler l'anémomètre de la centrale de mesure. Les valeurs des tensions à l'entrée de la centrale de mesures et les positions affichées sur le diviseur de tension de chacune de ces quatre voies sont les suivantes :

	B	F
courant faible	100 mV (1/1)	100 mV (1/1)
courant fort	10 V (1/100)	10 V (1/100)

Un relais, commandé par l'inverseur S, permet d'aiguiller les tensions provenant de B et F vers les deux voies préréglées correspondant soit au courant fort, soit au courant faible. Simultanément, ce relais met en court-circuit les deux voies inoccupées.

On branche sur d'autres voies de la centrale les tensions proportionnelles à la pression différentielle provenant d'un tube de Prandtl placé à côté du fil (capteur de pression type A C B de 0 à 4 mbar) et à la température (thermocouple). Les trois sondes de mesure sont placées ensemble dans la veine de la soufflerie d'étalonnage (décrite dans [35]). Une perforatrice commandée par la centrale enregistre sur ruban perforé les valeurs des tensions aux 6 voies suivantes :

Voie	Information
1	Température (thermocouple).
2	Vitesse (pression différentielle - capteur ACB).
3	Tension (courant fort) ou tension nulle.
4	Intensité (courant fort) ou tension nulle.
5	Tension nulle ou tension (courant faible).
6	Tension nulle ou intensité (courant faible).

On fait varier la température et la vitesse dans la soufflerie d'étalonnage et on fait un certain nombre d'enregistrements soit avec un courant fort, soit avec un courant faible (3 ou 4 seulement pour déterminer α). L'ensemble de l'appareillage est présenté sur la figure II.2.5.

Le dépouillement des résultats a été effectué à l'aide d'une calculatrice CAB 500, directement à partir du ruban perforé fourni par la centrale de mesures. Le calcul se faisait en plusieurs temps : tri des données courant fort et courant faible (à l'aide d'un test sur la valeur des tensions des voies 3 à 6) puis recherche du coefficient α par une méthode des moindres carrés à partir des mesures faites avec courant faible. Ensuite, à partir des mesures faites avec courant fort, on recherchait les coefficients A et B de la loi de King également par une méthode de moindres carrés. Deux à trois minutes de calculs étaient seulement nécessaires pour le calcul de dépouillement d'un fil.

La précision de la mesure est liée tout d'abord à la précision avec laquelle on connaît la vitesse et la température dans la veine de la soufflerie. Or ces grandeurs sont constantes à mieux que 1 % près dans la région où ont été placées les trois sondes. D'autre part, le thermocouple chromel-alumel fabriqué au laboratoire et étalonné par la méthode des points fixes (températures de fusion de la glace, de l'étain et du plomb à la

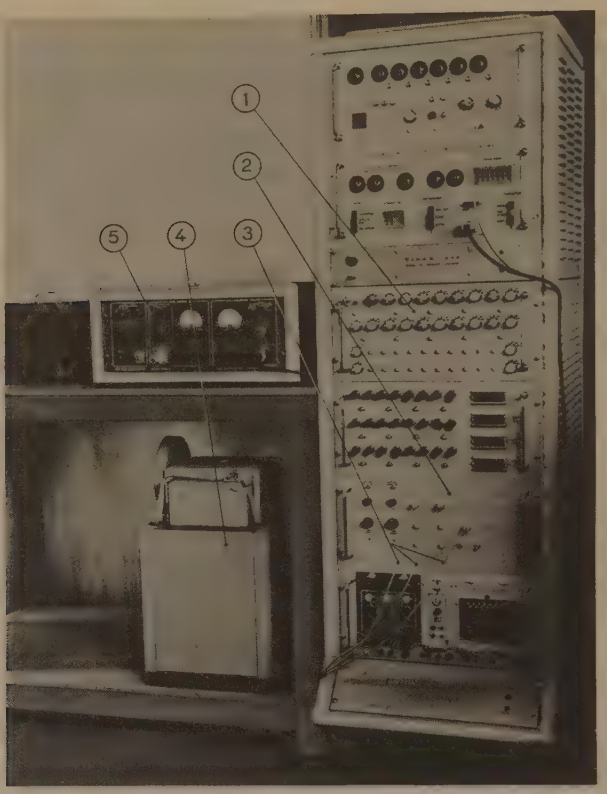
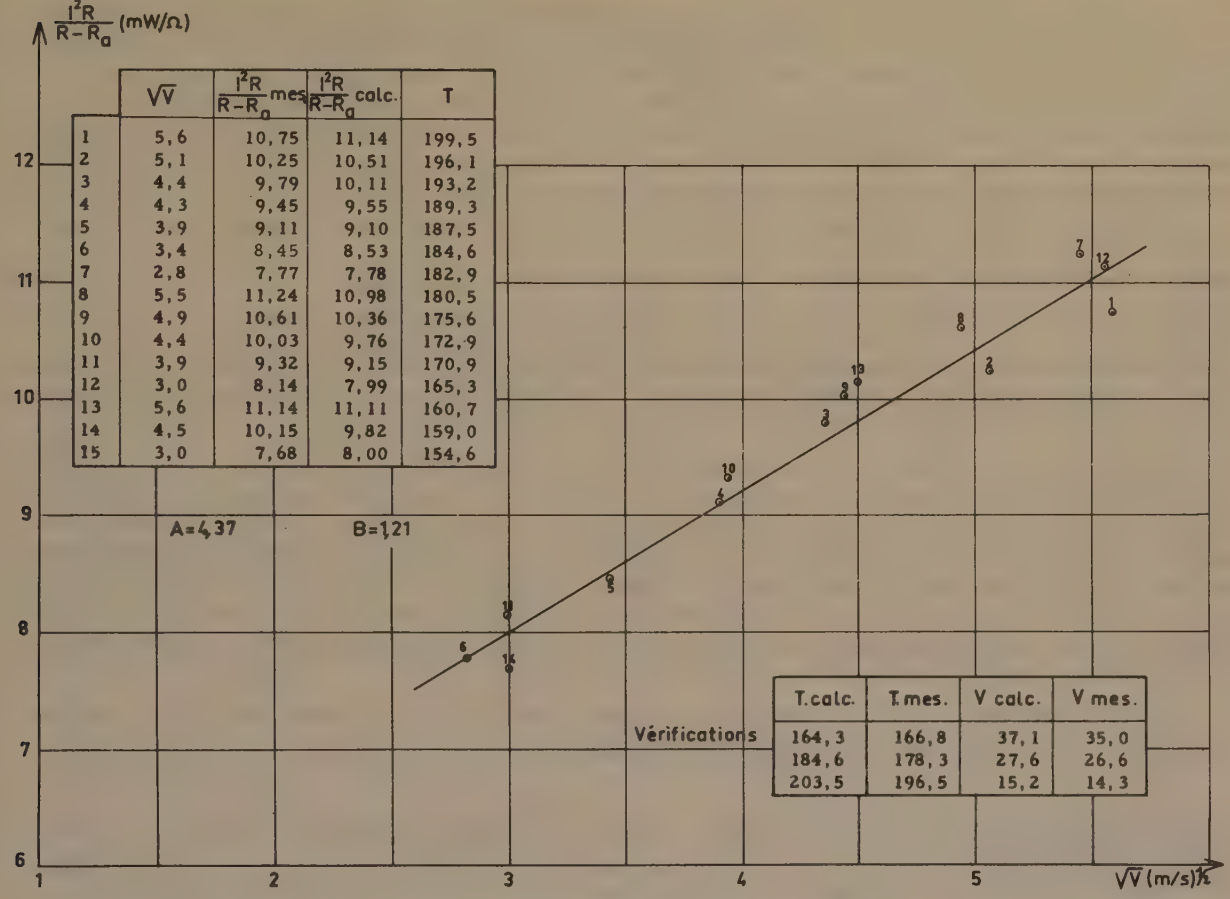


Figure II.2.5 - L'anémomètre à fil chaud et la centrale de mesures statique. 1 - Le tiroir d'entrée - tensions. 2 - Le tiroir d'amplification. 3 - Câbles provenant de l'anémomètre (tensions à amplifier et commande du relais). 4 - La perforatrice. 5 - L'anémomètre.

pression atmosphérique) permet une précision de l'ordre de 2°C à 3°C entre 150°C et 200°C. Les capteurs de pression, très sensibles, ont une précision fonction de leur étalonnage. Celui-ci a été effectué par comparaison avec un micromanomètre Fortier (méthode statique). On peut donc compter sur une précision de 0,1 mm CE ce qui correspond à une erreur relative maximale de l'ordre de 2 % pour des vitesses proches de 10 m/s.

De nombreux étalonnages ont été effectués. En général, après l'étalonnage proprement dit, on faisait quelques points supplémentaires de vérification : les valeurs de la tension et de l'intensité du courant permettant de calculer la vitesse et la température de l'écoulement, on pouvait comparer les valeurs obtenues aux valeurs mesurées directement. Un tel étalonnage est présenté sur la figure II.2.6. Malheureusement, la dispersion des points est grande. La précision d'une telle mesure ne peut pas être grande. Il y a plus important : après quelques jours, un deuxième étalonnage ne donnait pas des résultats très proches. La mesure simultanée de la vitesse et de la température au moyen d'un anémomètre à fil chaud ne semble pas possible avec une précision satisfaisante. Cependant nous avons continué un certain nombre d'essais pour essayer de trouver les raisons de ces difficultés.



	$\sqrt{V}$	$\frac{I^2R}{R-R_a}$ mes.	$\frac{I^2R}{R-R_a}$ calc.	T
1	5,6	10,75	11,14	199,5
2	5,1	10,25	10,51	196,1
3	4,4	9,79	10,11	193,2
4	4,3	9,45	9,55	189,3
5	3,9	9,11	9,10	187,5
6	3,4	8,45	8,53	184,6
7	2,8	7,77	7,78	182,9
8	5,5	11,24	10,98	180,5
9	4,9	10,61	10,36	175,6
10	4,4	10,03	9,76	172,9
11	3,9	9,32	9,15	170,9
12	3,0	8,14	7,99	165,3
13	5,6	11,14	11,11	160,7
14	4,5	10,15	9,82	159,0
15	3,0	7,68	8,00	154,6

T.calc.	T.mes.	V calc.	V mes.
164,3	166,8	37,1	35,0
184,6	178,3	27,6	26,6
203,5	196,5	15,2	14,3

Figure II.2.6 - Etalonnage d'un fil en soufflerie.

II.2.4 - ESSAIS DE MESURE SIMULTANÉE DE LA VITESSE ET DE LA TEMPÉRATURE DANS LE SILLAGE DU TUBE À L'AIDE DU FIL CHAUD.

Nous avons donc essayé d'explorer le sillage à l'aide du fil chaud. Nous avons utilisé également la centrale de mesures avec 4 voies de mesures seulement : tension et intensité en chauffes forte et faible et une voie constituée seulement par un codeur manuel pour repérer la position de la sonde dans le sillage. Pour chaque point de mesure, on faisait fonctionner l'appareil une fois en chauffe faible, puis une fois en chauffe forte, les premières valeurs enregistrées servant à la détermination de la température. Les différentes tensions étaient moyennées sur 0,1 s (mesure des intensités du courant, très stables) ou sur 1 s (mesure des tensions aux bornes du fil, valeurs fluctuantes). On a pu ainsi explorer une dizaine de "transversales" perpendiculaires à l'axe de l'écoulement et au tube dans le plan médian de la gaine à des distances du tube variant entre 0 et 150 mm.

Il fallut se rendre bien vite à l'évidence : les valeurs obtenues à l'étalonnage n'étaient plus valables (l'étalonnage avait eu lieu quatre à cinq jours auparavant). Cependant, pour essayer de tirer le maximum d'enseignements de ces mesures nous avons utilisé une méthode approchée pour le dépouillement.

La droite de King peut en effet être obtenue par deux points de mesure à deux vitesses différentes, de même que le coefficient α peut être obtenu par deux mesures à deux températures différentes. Or, nous avons ces deux états : écoulement non perturbé dans la gaine (V_o, T_o, mesurés grâce à un tube de Prandtl et un thermocouple à l'amont du tube) et en dehors de la gaine (vitesse nulle, température ambiante). Il n'y a pas de difficultés pour l'évaluation de α. Mais pour la détermination des coefficients A et B on doit remarquer que l'on fait une erreur systématique (voir figure II.2.7) : la courbe donnant $\frac{I^2R}{R - R_a}$ en fonction de $\sqrt{V}$ n'est plus une droite pour les vitesses faibles (à ce moment interviennent les phénomènes de convection naturelle) et en prenant pour A la valeur de $\frac{I^2R}{R - R_a}$ à vitesse nulle, on aura des valeurs de la vitesse plus faibles que dans la réalité. Mais l'erreur systématique introduite est toujours inférieure aux erreurs expérimentales, d'autant plus que la zone de mesures, où l'on utilise cette approximation est peu étendue.

Avec ces hypothèses, on a donc dépouillé les mesures : la dispersion des résultats est considérable : on peut en juger sur la figure II.2.8. De toutes façons, on pouvait s'attendre à avoir de la dispersion dans la zone du sillage, région particulièrement instable. Mais les mesures faites dans la région non perturbée ont un caractère aléatoire au moins aussi marqué. Il faut donc incriminer la méthode elle-même qui consiste à faire subir au fil des variations continuelles de température : il est long à reprendre un régime d'équilibre et, à supposer qu'il ne se détériore pas, il est probable qu'il n'a pas atteint la stabilité lorsque l'on procède à la mesure suivante.

Pour cette raison, on a procédé à d'autres essais en fournissant au fil un courant d'intensité constante, soit très faible, soit importante.

II.2.5 - MESURE DE LA TEMPÉRATURE SEULE AU MOYEN DU FIL CHAUD.

Dans cette série d'essais, on a maintenu dans le fil un courant d'intensité faible : de 1 à 2 mA et on a mesuré la tension aux bornes de la sonde donc sa résistance et la température de l'écoulement. Le coefficient α était évalué par la variation de résistance mesurée entre température ambiante et température de l'écoulement non perturbé dans la gaine : en fait, le premier point de mesure, à 100 mm de l'axe de l'écoulement, servant à cette évaluation, ne donnait pas une bonne valeur : à partir de ce coefficient α, le dépouillement de l'ensemble donnait des valeurs de $\frac{T - T_E}{T_o - T_E}$ très différentes de 1 pour des points que l'on pouvait cependant considérer comme se trouvant dans l'écoulement non perturbé. On a donc par la suite déplacé les courbes pour faire coïncider leur base avec la valeur 1.

De même, par suite de défauts de construction de l'appareil d'exploration, la position de la sonde par rapport à l'axe de l'écoulement n'était pas connue de façon absolue, alors que les déplacements relatifs étaient déterminés de façon précise. On a donc également déplacé les courbes pour les amener dans l'axe.

Les résultats expérimentaux et les courbes obtenues à partir de ces résultats sont donnés en Annexe I. La dispersion des points est encore importante. Notamment dans la partie de l'écoulement extérieure au sillage, les écarts atteignent et dépassent même 1°C. Cela ne peut être imputé à la non uniformité de l'écoulement : on le verra au chapitre suivant. Il reste en fait deux raisons :

- les caractéristiques du fil ne sont pas constantes : ce n'est guère plausible, puisque l'on ne fait pas subir de choc thermique au fil et que ces variations ont un caractère aléatoire ;

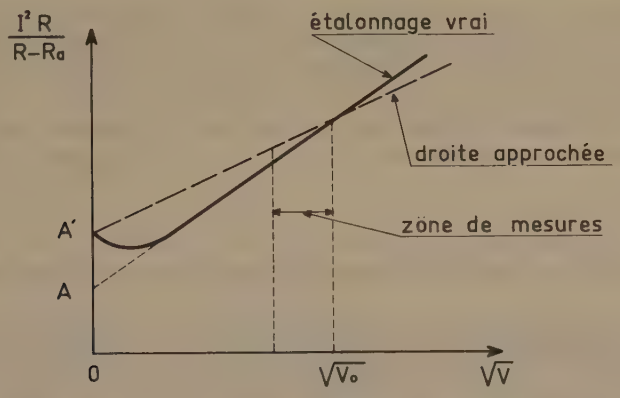


Figure II.2.7 - Approximation réalisée pour le dépouillement.

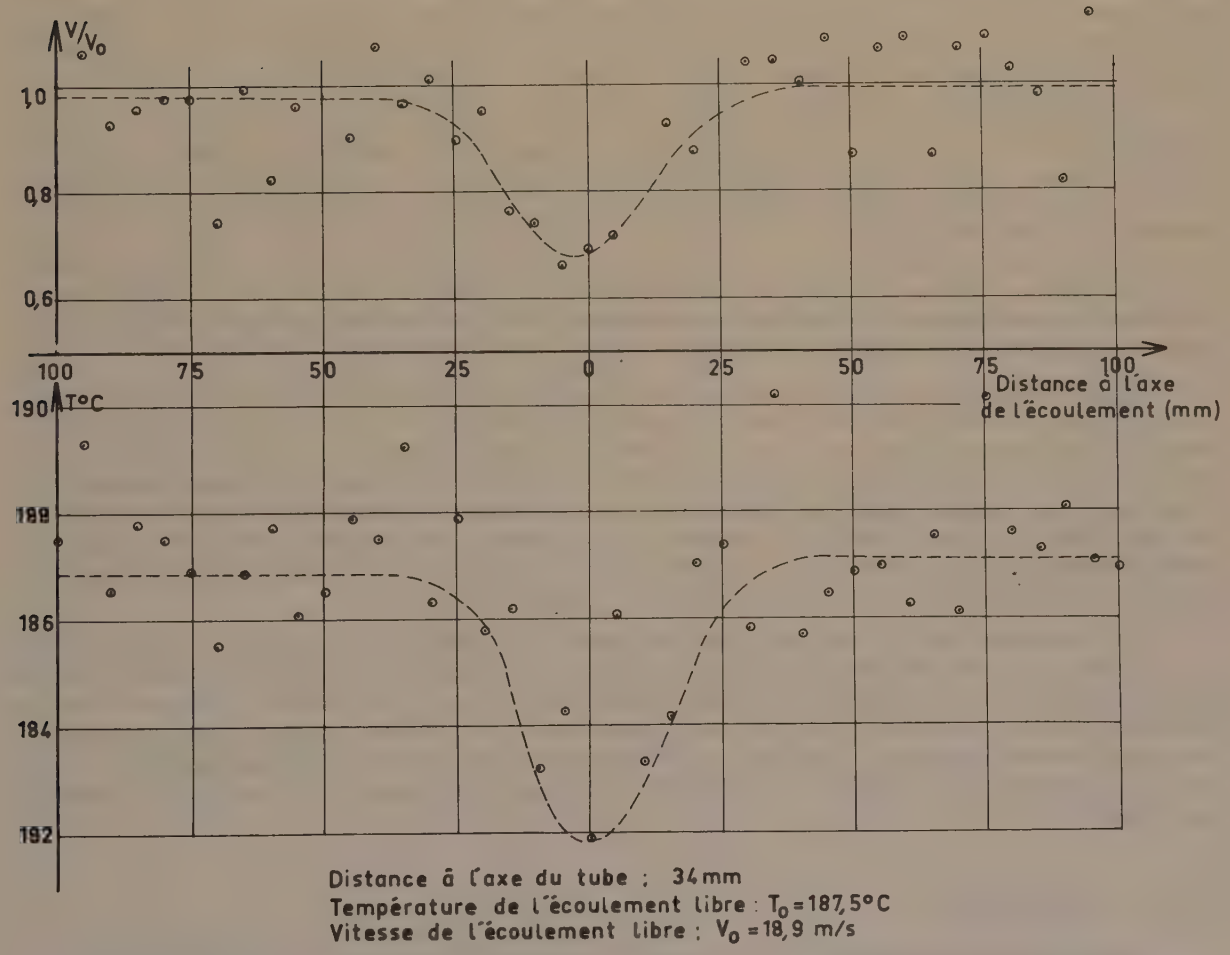


Figure II.2.8 - Essai de mesure simultanée de la vitesse et de la température dans le sillage du tube isolé.

- la méthode manque de précision. Il semble bien que cela suffise à expliquer les écarts observés. Une mesure de résistance, pour être précise, doit être faite avec une méthode de zéro (un pont de résistances par exemple) et l'on ne peut espérer de bons résultats en mesurant la tension aux bornes du fil alimenté avec un courant d'intensité faible. Autrement dit, la méthode servant aux mesures de vitesses ne peut pas être extrapolée pour les mesures de températures. Un fil chaud n'est pas un bon thermomètre dans ces conditions.

II.2.6 - MESURES DE LA VITESSE SEULE AU MOYEN DU FIL CHAUD.

Nous avons voulu également explorer le sillage avec du fil chaud alimenté cette fois avec une intensité convenable (30 à 40 mA) de manière à ce qu'il soit sensible à la vitesse. Comme précédemment, on évitait les chocs thermiques en gardant la même intensité. Pour le dépouillement, on a considéré que l'écoulement était isotherme. On aurait pu d'ailleurs tenir compte d'une distribution de température comme par les mesures du paragraphe précédent. En fait, cela s'est avéré inutile puisque les endroits où la température varie sont justement ceux où la mesure de la vitesse n'est plus valable : les régions du sillage où la vitesse varie constamment en grandeur et direction.

On a procédé de la manière indiquée au paragraphe I.2.3, en mesurant la tension d'abord à l'extérieur de la gaine pour connaître une valeur approchée du coefficient A de la loi de King. Les résultats expérimentaux et les courbes sont reproduites en Annexe II. Seuls, ceux concernant quatre "transversales" ont été retenus. En effet, certains fils avaient des caractéristiques qui changeaient de façon considérable. Par exemple, à la fin de l'exploration, on pouvait trouver une valeur de V/V_0 égale à 1,2 correspondant à une variation plus ou moins continue de la résistance R_0. Pour éviter de tels désagréments, on observait pendant une à deux minutes les variations de tension aux bornes du fil dans la gaine avant de commencer les mesures, pour éliminer les mauvais éléments.

Malgré cela,les points présentent une dispersion importante. Elle provient de plusieurs causes : d'une part la variation des caractéristiques du fil due à la température élevée du fil variant elle-même avec la vitesse. Il faut remarquer d'ailleurs que lorsque l'on travaille à température ambiante (cas de l'utilisation courante de l'anémomètre à fil chaud) on a un rapport R/R_0 de l'ordre de 1,8. Lorsque la température de l'écoulement est plus élevée, on doit avoir un rapport R/R_0 également du même ordre pour obtenir la même précision. Ceci entraîne une température de travail du fil beaucoup plus importante dans ce dernier cas et une détérioration plus rapide.

La dispersion du fil est également due aux variations très importantes de la vitesse en grandeur et direction dans la zone du sillage. A ce sujet, il est intéressant d'observer les résultats de la transversale la plus proche de l'arrière du cylindre : ils sont plus cohérents. Peut-être est-ce dû au fait que l'écoulement est encore stable, que les tourbillons sont encore réguliers et n'ont pas encore donné naissance au sillage instable. On a tracé, à titre de comparaison la valeur de V/V_0 calculée d'après la théorie de l'écoulement potentiel.

II.2.7 - CONCLUSIONS.

Nous avons voulu utiliser le fil chaud au cours de cette étude en raison des avantages qu'il semblait présenter dans le cadre de cette étude : dimensions restreintes, possibilité théorique de mesurer à la fois vitesse et température, facilité d'adaptation à un système d'enregistrement électrique de mesures.

L'écoulement où cet appareil devait fonctionner était caractérisé essentiellement par sa température relativement élevée (175°C) et son instabilité. C'est essentiellement pour ces deux raisons que les résultats furent décevants et l'on peut expliquer brièvement nos constatations :

1/ mesure de la vitesse.

De toute façon l'instabilité de l'écoulement ne permet pas une mesure théoriquement exacte : le fil n'est pas sensible à la direction de la vitesse et quand celle-ci varie beaucoup, la réponse moyenne du fil ne reflète pas la valeur moyenne de la vitesse.

Mais, d'autre part, dans les régions où la vitesse ne varie pas de façon appréciable (région extérieure à la zone de sillage) la mesure est délicate : on doit chauffer le fil à une température supérieure à celle de l'écoulement, ce qui contribue à le rendre fragile (avec un même courant de chauffe, plongé dans l'air à température ordinaire, le fil casse immédiatement).

2/ mesure de la température.

Les sondes de température à résistance de platine sont parmi les plus précises qui existent. Mais, dans le cas présent, deux faits rendent imprécis l'emploi des fils chauds pour cette mesure : d'une part, leur fragilité (ils sont très petits et non protégés) ; d'autre part, la méthode de mesure utilisée pour les fils chauds : mesure de la tension aux bornes du fil et de l'intensité du courant électrique,ne peut rivaliser avec une méthode de zéro que l'on utilise généralement avec les thermomètres à résistance de platine.

3/ mesure simultanée de la vitesse et de la température.

En plus des inconvénients exposés ci-dessus, il faut signaler le fait que l'on doive passer alternativement de surchauffe "forte" en surchauffe "faible" pour chaque mesure. Le fil n'y résiste généralement pas longtemps.

Chapitre III

Autres appareils de mesure essayés sur le circuit avec le tube isolé

II.3.1 - LA SONDE À THERMISTANCE.

Après l'échec dû au fil chaud, nous avons cherché un autre appareil de mesure pour la température en renonçant à mesurer la vitesse. Nous avons ainsi essayé une thermistance TRANSCO de petites dimensions (voir figure II.3.1). Cette sonde est vendue par le fabricant dans une gaine de verre assez épais et est destinée à être utilisée de cette manière. Nous avons dû casser avec précaution cette enveloppe pour en extraire la partie sensible et la souder sur les sondes à la place du fil chaud.

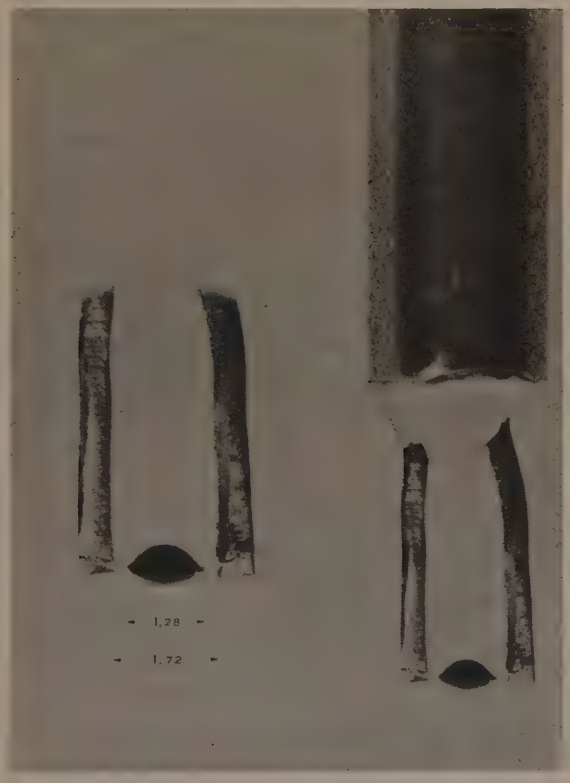


Figure II.3.1 - La sonde à thermistance.

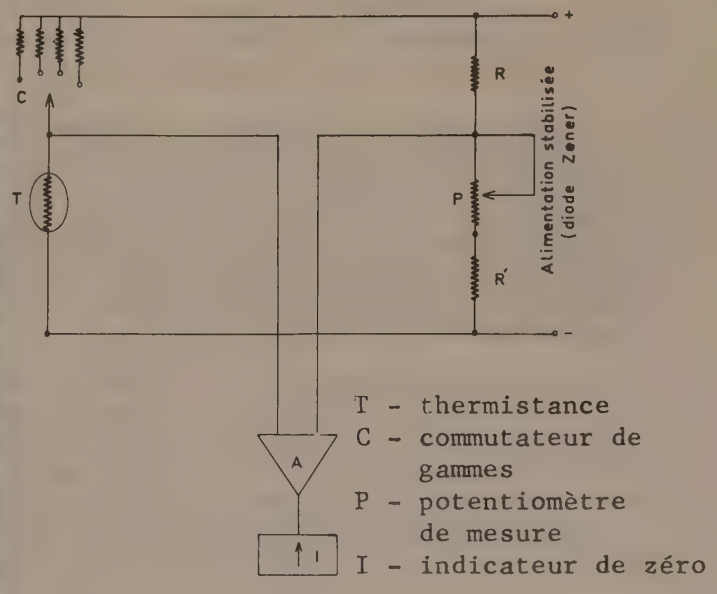


Figure II.3.2

La thermistance a une résistance électrique (1000 ohms à 0°C) variant énormément avec la température, mais de façon non linéaire. Le problème pour la mesure n'est pas de trouver des appareils sensibles, mais plutôt d'avoir des éléments précis et stables et de faire un étalonnage très soigné. Nous avons réalisé le montage indiqué par la figure II.3.2. La thermistance T est placée dans l'une des branches d'un pont de Wheatstone. Dans les autres branches, sont placées des résistances bobinées en manganèse R et R', un commutateur C et un potentiomètre 10 tours linéaire à 0,25 % qui est l'organe de lecture. L'équilibre du pont est apprécié au moyen d'un indicateur de zéro rendu plus sensible par un amplificateur A.

Les thermistances peuvent être utilisées dans une gamme de températures allant de 0°C à 200°C environ. Le commutateur permet d'utiliser toute l'étendue du potentiomètre P pour un intervalle de température de 30°C environ, les différents intervalles se recouvrant légèrement. On peut donc dire qu'une graduation du potentiomètre correspond en moyenne à 0,03°C et le déséquilibre du pont correspondant est très facilement détecté. Il ne reste donc plus à résoudre que le problème de l'étalonnage pour avoir un instrument de mesure très précis.

Nous avons utilisé pour cela une étuve régulée (Delta Design) dont les variations de température n'excédaient pas 0,1°C mais dont la température, en moyenne, restait stable de façon plus précise. Pour plus de sûreté, nous avons entouré la sonde d'un manchon en verre pyrex pour augmenter son inertie thermique. Après une quinzaine de minutes, on ne pouvait plus déceler d'évolution de la température sur l'indicateur de zéro.

Pour une mesure absolue de la température dans l'enceinte régulée, nous avons utilisé une résistance de platine étalon fabriquée et étalonnée par ROSEMOUNT et dont les caractéristiques sont les suivantes :

résistance à 0°C 25,55Ω ± 0,05Ω

stabilité 0,01°C

précision de l'étalonnage 0,015°C entre – 180°C et 350°C

Pour mesurer la résistance de l'étalon, nous avons utilisé un double pont de Kelvin décrit dans [36] dont les éléments principaux sont un ensemble de deux décades à transformateur (résolution 10^{-7}, précision 10^{-6}), une résistance étalon de 100 Ω (à 10^{-4}) et un indicateur de zéro très sensible. Les auteurs assurent, avec cet ensemble et un thermomètre à résistance de platine étalon, une précision de 3.10^{-4}°C dans la gamme de températures prévue par l'échelle internationale, ce qui est au-dessus de nos ambitions. Nous avons fait de cette manière quatre points de mesure dans la gamme de températures qui nous intéressait : de 160°C à 180°C :

T (°C)	N (indication du potentiomètre)
163,91	7,63
171,42	8,78
176,84	9,53
180,55	10,00

et avons utilisé la formule d'interpolation suivante :

$$T = 80,453 + 20,749\ N - 1,968\ N^2 + 0,089\ N^3$$

Cette formule (les coefficients sont connus avec sept chiffres significatifs) nous assure une précision de 0,1°C pour une mesure réalisée dans un milieu isotherme en régime permanent.

Les résultats complets de cette exploration sont donnés en Annexe III, ainsi que les courbes que l'on peut tracer à partir de là.

Ces résultats nous ont inspiré les deux remarques suivantes :

1/ dans la partie de l'écoulement non perturbé (en dehors du sillage) on n'observe pas de fluctuations de la température ayant un caractère aléatoire. Vu la précision de la mesure, on peut affirmer que les variations enregistrées (environ 0,3°C) sont dues à une mauvaise distribution initiale des températures dans la gaine ou bien à des variations de fonctionnement du réchauffeur d'air. La précision de la thermistance satisfait donc largement nos besoins pour un écoulement permanent.

2/ dans le sillage du tube les mesures sont également bien alignées ; on ne retrouve plus les "dents de scie" que l'on avait pu observer lors de l'exploration avec le fil de platine. La thermistance ayant des dimensions géométriques et une inertie thermique plus importantes que le fil "intègre" en quelque sorte la température dans le temps et dans l'espace et efface les irrégularités, qu'elles soient dues à une fluctuation dans le temps ou à une discontinuité brutale existant en fait dans le sillage.

On peut ainsi supposer que cet instrument donnera des valeurs acceptables pour les mesures à l'intérieur du faisceau tubulaire.

II.3.2 - MESURES DE LA PRESSION À LA PAROI DU CYLINDRE.

Les mesures de la pression à la paroi étaient destinées à connaître la valeur de la vitesse de l'écoulement en dehors de la couche-limite (la discussion de la validité de cette méthode sera entreprise dans la dernière partie). De toutes façons, il a fallu expérimenter le système prévu sur le tube isolé.

La modification réalisée est représentée sur la figure II.3.3. Une prise de pression de 1 mm de diamètre a été ménagée dans la paroi du tube au milieu de la longueur utile du tube. Un tube de diamètre extérieur 2 mm chemine à l'intérieur du cylindre et ressort par le trou dans lequel est passé ordinairement le porte-sonde après avoir traversé une deuxième fois le cylindre principal. Le montage a été réalisé en perçant tout d'abord deux ouvertures dans le cylindre permettant au petit tube de passer librement. Ensuite on a brasé le tube sur le cylindre et l'on a rectifié et poli le cylindre de 20 mm à l'endroit de la prise de pression.

La pression statique dans la gaine est inférieure à la pression atmosphérique (environ 200 mm CE de dépression). On a donc mesuré la différence de pression entre la pression entre la pression statique p_o à l'amont du cylindre et la pression à la paroi au moyen d'un manomètre différentiel type ACB à variation d'inductance mutuelle ayant une réponse linéaire. Ce manomètre est très précis, mais son zéro se déplace de manière sensible au cours du temps : quelques millivolts en une journée. Pour cette raison, on a pris la précaution de refaire l'équilibrage à pression différentielle nulle tous les trois ou quatre points de mesure.

Les résultats obtenus sont reproduits en Annexe IV. Nous les avons comparés avec ceux publiés par Fage et Falkner [3] correspondant à un nombre de Reynolds malheureusement différent. Cependant on peut voir une bonne coïncidence pour la partie antérieure du cylindre : la pression dans le sillage est plus faible. Il est également intéressant de constater l'écart systématique entre les mesures réalisées à froid et les mesures avec transfert de chaleur.

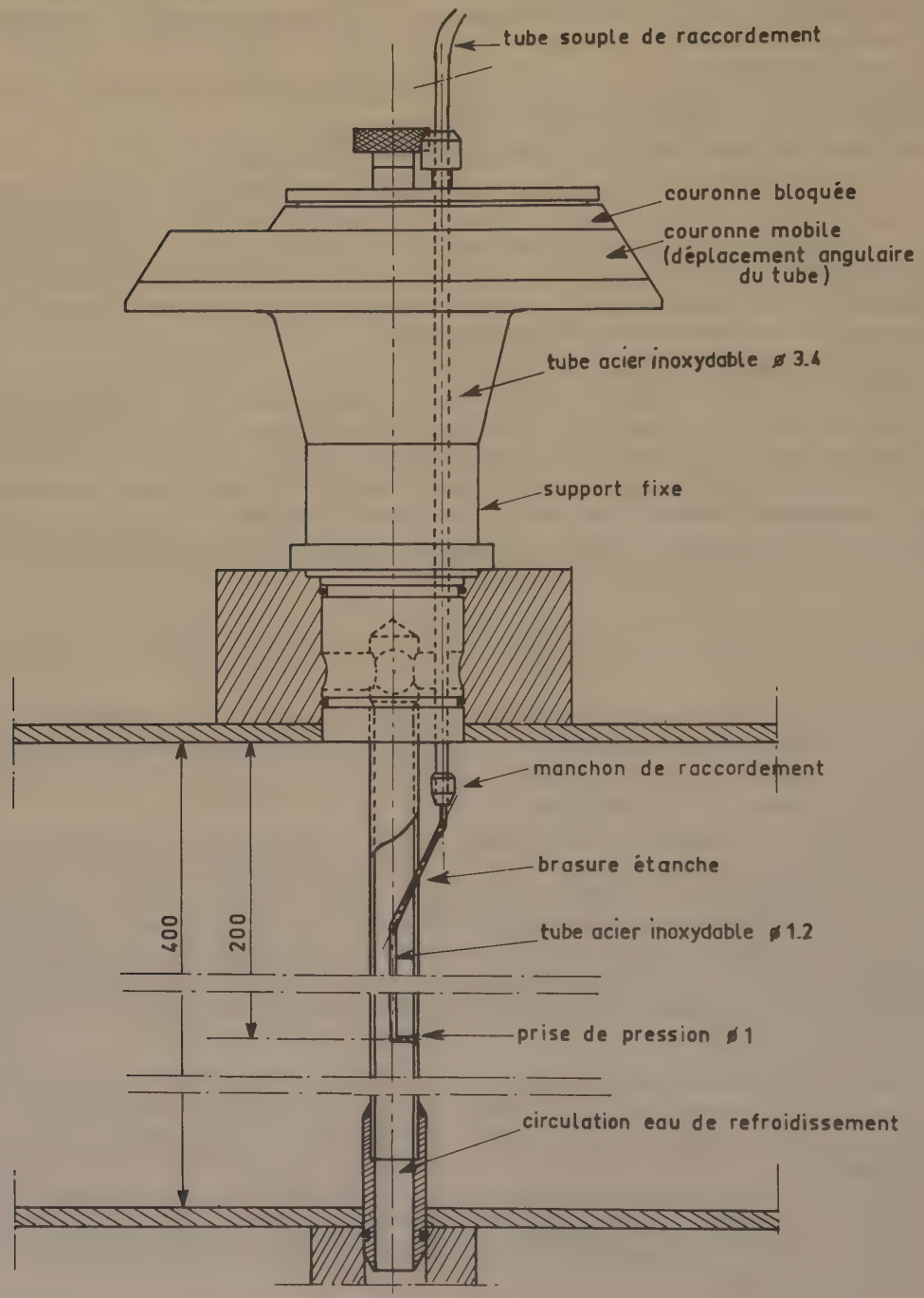


Figure II.3.3 - Modification réalisée pour mesurer la pression à la paroi du tube.

Cet écart ne se manifeste pas tellement sur la partie arrière du cylindre : les coefficients K_p, calculés à partir de mesures de pression peu stables peuvent être considérés comme égaux. Par contre, le point où la vitesse est maximale se trouve rejeté vers l'arrière de quelques degrés d'arc lorsqu'il y a transfert. Nous ne retrouverons pas ce phénomène pour les mesures réalisées dans le faisceau (§ III.2.1).

II.3.3 - CONCLUSIONS.

Pour les mesures à l'intérieur du faisceau tubulaire, nous ne pouvons pas utiliser l'anémomètre à fil chaud. Cependant deux types de mesures pourront être réalisées : les mesures de pression à la paroi des tubes et les mesures de température dans l'espace compris entre les tubes, grâce aux thermistances.

Les premières nous donneront la valeur de la vitesse à l'extérieur de la couche-limite laminaire se formant à la surface des cylindres. Les secondes nous donneront une indication sur l'évolution de la température dans le faisceau.

Troisième partie

Étude d'un faisceau tubulaire

Principales notations de la troisième partie

x, y - Coordonnées physiques de la couche limite (figure III.3.1).

θ - Distance angulaire au point d'arrêt amont (dans l'axe de l'écoulement).

D - Diamètre des tubes S_T, S_L, espacements longitudinal et transversal des tubes.

u, v - Coordonnées de la vitesse suivant (x, y).

Δx - $x_i - x_{i-1}$

ρ, μ, λ - Masse volumique, viscosité dynamique, conductivité thermique.

ν - viscosité cinématique.

h - Enthalpie (couche-limite) et coefficient de transfert thermique.

p - Pression.

H - $h + \frac{u^2}{2}$(couche-limite) ; $g = \frac{H}{H_e}$.

T - Température absolue.

ψ, η, f - Définis respectivement par les équations (4), (5), (6).

Y, Z - Définis par (9).

C - $\frac{\rho\mu}{\rho_e\mu_e}$: $P = \frac{x}{U_e}\frac{du_e}{dx}$

Y+, Z+, Y−, Z−, Y_π, Z_π, voir figure III.3.1.

F = Y ou Z

τ_p - Tension pariétale : $\tau_p = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_\pi$

Nombres sans dimension.

Pr - Nombre de Prandtl supposé constant.

Re - Nombre de Reynolds $Re = \frac{V_o D \rho_o}{\mu_o}$

K_p - Coefficient de pression $K_p = \Delta p / \left(\frac{1}{2}\rho_o V_\pi^2\right)$

C_f - Coefficient de frottement local : $C_f = \tau_p / \left(\frac{1}{2}\rho_o V_o^2\right)$

Nu - Nombre de Nusselt local $Nu = \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p \frac{D}{T_\infty - T_p}$

Indices.

e - Ecoulement à l'extérieur de la couche limite.

∞ - Ecoulement à l'infini amont (couche limite).

o - Ecoulement à l'amont du faisceau.

i - Indice de progression en x : indice d'itération.

N - Numéro de la rangée dans le faisceau.

p - Valeur à la paroi.

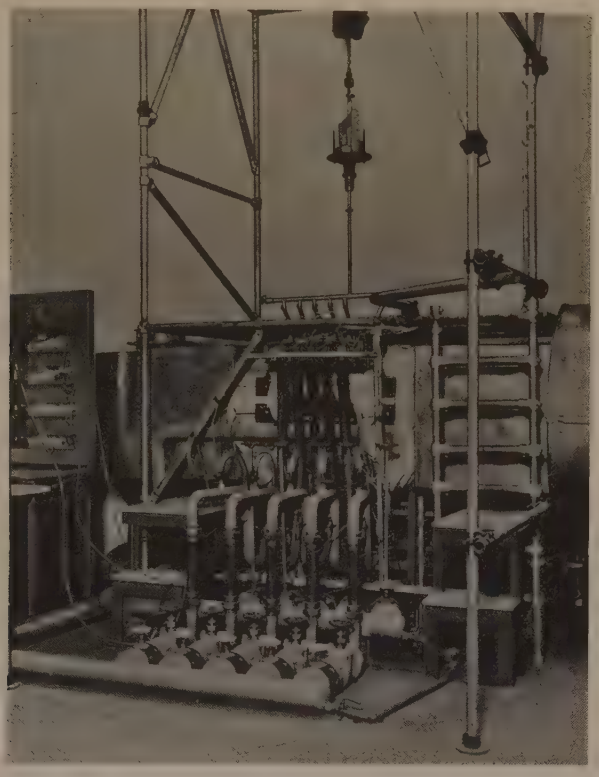


Figure III.1.1 - Vue d'ensemble de l'installation d'essais.

Chapitre I

Dispositifs expérimentaux

III.1.1 - DESCRIPTION GÉNÉRALE.

Après les différents essais réalisés sur un tube isolé, on a pu construire un échangeur de cent tubes en profitant de l'expérience acquise. L'ensemble de l'installation est représenté sur la figure III.1.1. Seule la partie centrale de la veine d'essai a été remplacée par l'échangeur. On a dû également mettre en place un système de manutention et une plate-forme d'accès pour faciliter les différentes opérations de déplacement des sondes.

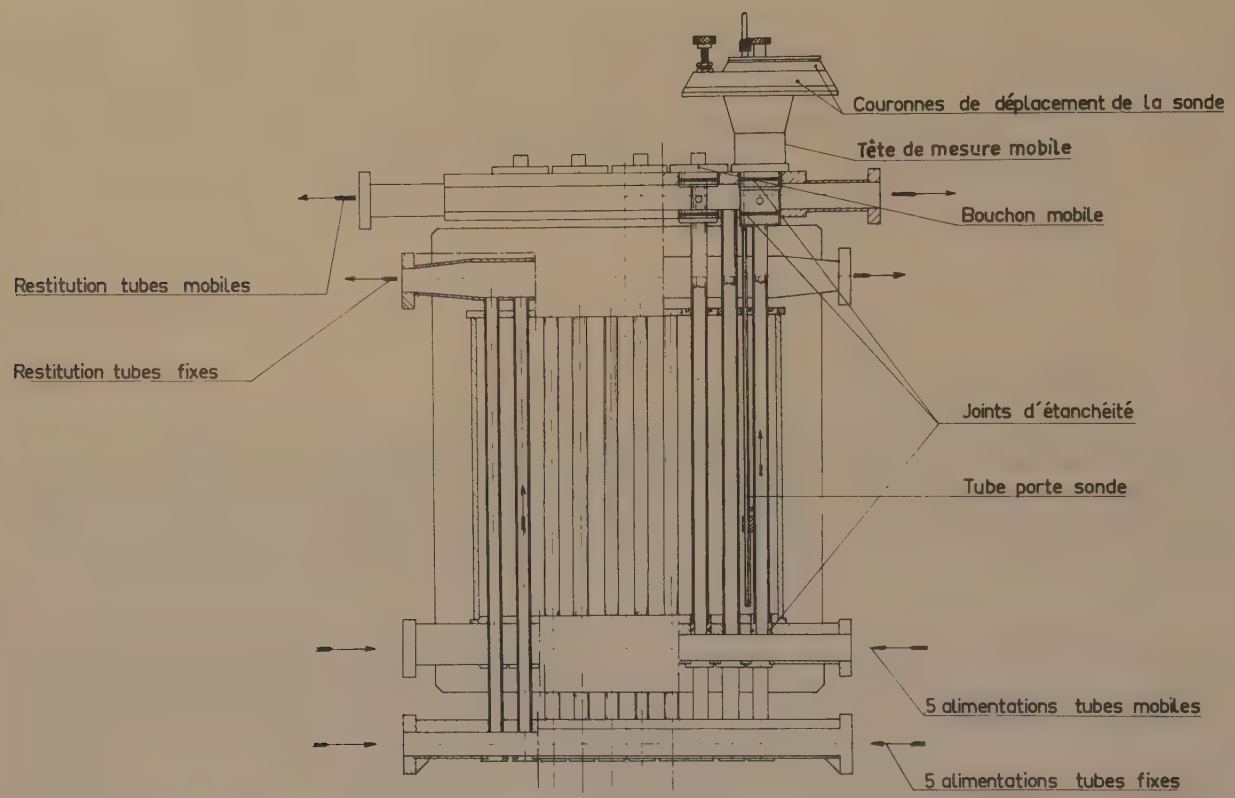
L'échangeur lui-même est un bloc assez compact de 400 kg (figures III.1.2 et III.1.3). Il comporte alternativement une rangée de dix tubes "fixes" et une rangée de cinq tubes "fixes" et de cinq tubes "mobiles". Les tubes mobiles peuvent être remplacés par la tête de mesure, semblable à celle utilisée pour les expériences réalisées avec un tube isolé. Le problème le plus délicat qui s'est posé pour la réalisation de cette pièce fut celui du manque de place : si on veut des tubes mobiles, il faut prévoir des joints, donc un diamètre assez important à ce niveau. Pour cette raison, un tube sur quatre a été rendu mobile : une rangée sur deux a été décalée en hauteur de manière à laisser toute la surface disponible pour réaliser l'étanchéité des tubes mobiles des autres rangées.

Chacun des tubes mobiles (la tête de mesure également) se présente ainsi, de haut en bas : un carré de fixation, une partie traversant la tuyauterie d'alimentation d'eau et séparée par deux joints toriques, une partie "morte", un pion de centrage à l'entrée de la gaine, la largeur utile, c'est-à-dire 400 mm et le tube se termine dans la tuyauterie d'eau (étanchéité par joint torique).

Les tubes fixes sont soudés aux tuyauteries d'eau et traversent librement la gaine avec un jeu faible. Ils ont également une partie "morte" située au-dessous de l'échangeur.

On a pu mettre un calorifuge sur les faces latérales de la gaine mais, au-dessus et en-dessous de l'échangeur, on n'a pas pu placer d'isolant. Pour cette raison, on a abandonné toute possibilité de faire des bilans thermiques. Le but primitif de cette étude était d'ailleurs de faire des mesures fines dans le faisceau lui-même.

La tête de mesure (figure III.1.4) a subi deux modifications principales : on a renforcé le système de fixation inférieur des porte-sondes de manière à donner une rigidité plus grande au tube de 4 mm. Les déplacements sont ainsi plus réguliers. On a également fixé à la partie supérieure une plaque de plexiglas sur laquelle ont été représentés les tubes voisins du tube porte-sondes. Un index, se déplaçant dans le plan de cette plaque, figure la sonde et permet à l'opérateur de se rendre compte à chaque instant de la position de l'élément sensible par rapport aux autres tubes du faisceau. De cette manière on peut éviter les chocs qui détruiraient la sonde.



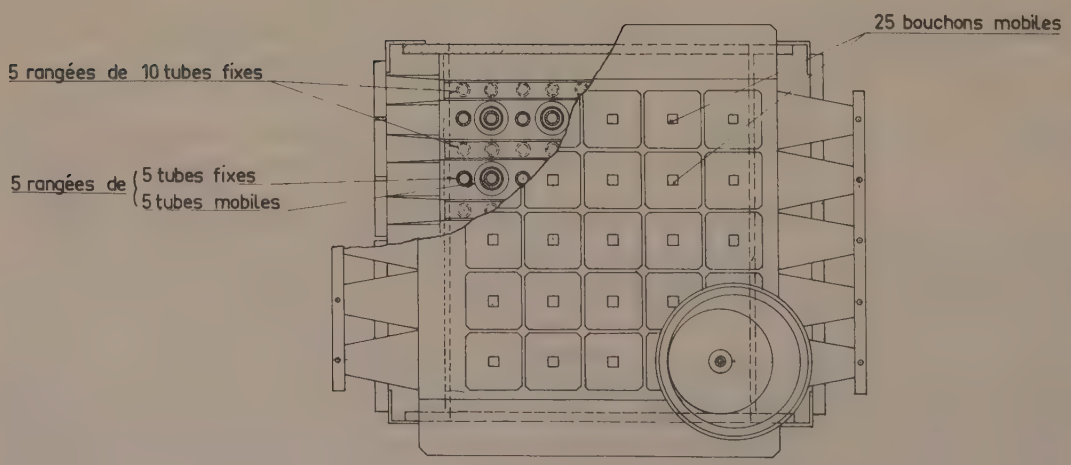


Figure III.1.2 - Plan schématique de l'échangeur.

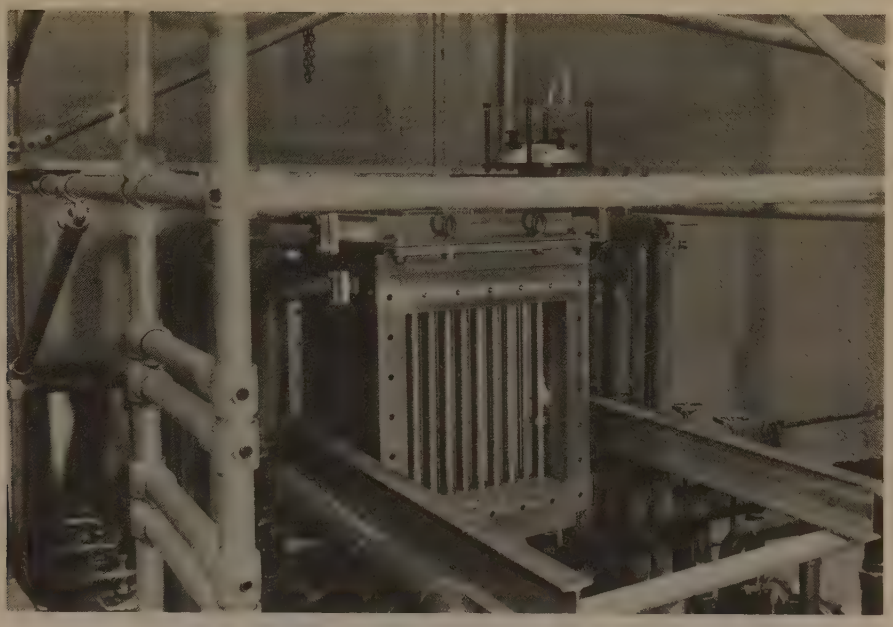


Figure III.1.3 - L'échangeur "cent tubes".

III.1.2 - LE SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT DES TUBES (figure III.1.5).

Il a fallu prévoir une installation permettant de démonter un quelconque des tubes mobiles sans arrêter l'écoulement d'air tout en conservant un refroidissement partiel du faisceau. Les différents joints toriques résistent en principe à des températures de l'ordre de 200°C, mais si on veut leur conserver leurs propriétés, il est nécessaire qu'ils ne soient pas soumis pendant de longues périodes à des températures élevées.

Pour cette raison, on a adopté une alimentation en eau rangée par rangée. De cette manière, il est possible d'isoler l'une des cinq rangées comportant des tubes mobiles et de la vidanger complètement au moyen d'un système de vannes, de robinets de vidange, et de purges d'air, sans arrêter le refroidissement des autres rangées. Aussitôt après le remplacement de la tête de mesure par un bouchon mobile, on pouvait remettre l'eau en circulation dans la rangée. Cette opération n'excédait pas cinq minutes : la manipulation de la tête de mesure est facilitée par l'usage d'un petit palan mobile qui permet de la retirer sans heurts.

Chacun des dix circuits d'eau est muni d'une vanne de réglage et d'un rotamètre, ce qui permet d'équilibrer les débits dans les rangées (débit maximal 0,7 l/s par rangée). L'eau est puisée dans une cuve de grande capacité et rejetée ensuite dans la même cuve. L'échauffement de l'eau n'est pas sensible au cours d'une journée. On prenait cependant la précaution de renouveler une partie de l'eau de la cuve après chaque essai.

III.1.3 - POSSIBILITÉS DE L'ÉCHANGEUR.

Vingt-cinq tubes seulement peuvent être enlevés et remplacés par la tête de mesure. En fait, on peut retourner l'échangeur (en le faisant pivoter de 180° autour d'un axe verti-

Figure III.1.4 - La tête de mesure.

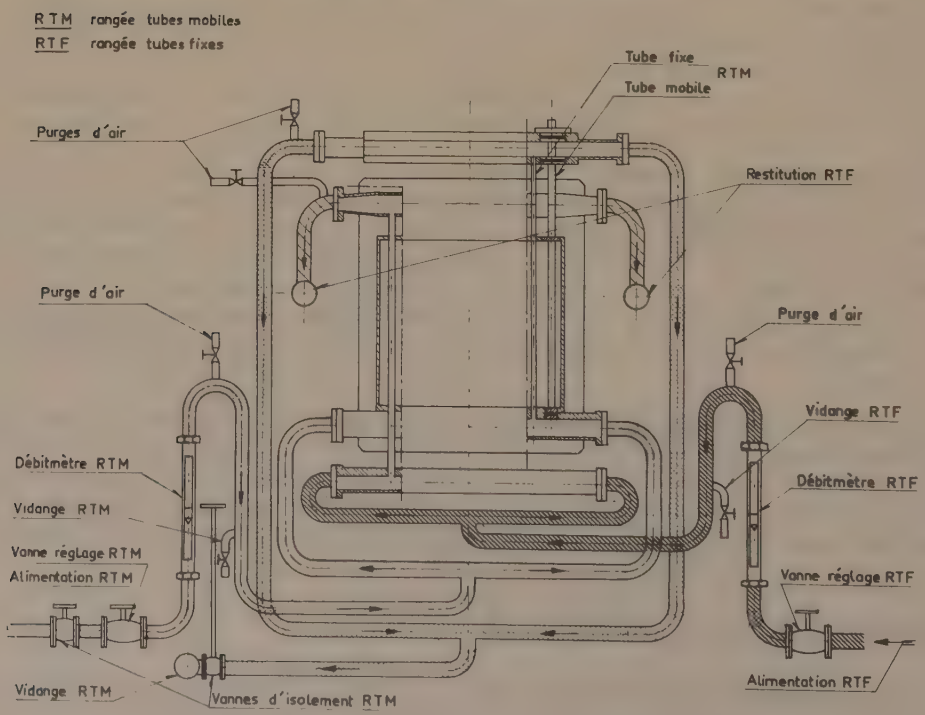


Figure III.1.5 - Le système de refroidissement des tubes.

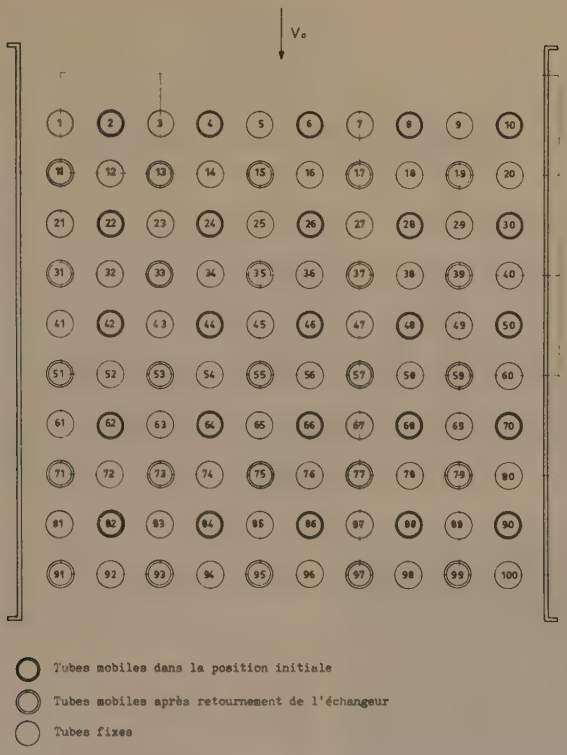


Figure III.1.6 - Position des tubes mobiles dans le faisceau.

cal). Alors la dernière rangée (comprenant des tubes fixes) devient la première. De façon plus précise, les rangées impaires, qui comprenaient des tubes mobiles, n'ont plus que des tubes fixes ; les rangées paires, qui n'avaient que des tubes fixes, comprennent des tubes mobiles. La figure III.1.6 montre la disposition générale du faisceau. On y a représenté schématiquement la position des carrés de fixation des tubes mobiles lorsque l'échangeur est dans la position initiale. Cet artifice a permis de doubler les possibilités de l'appareillage.

Chapitre II

Résultats expérimentaux

III.2.1 - MESURE DE LA PRESSION À LA PAROI DES TUBES.

Nous avons transformé la tête de mesure (comme indiqué dans le paragraphe II.3.2) pour pouvoir mesurer la pression et nous l'avons placée à différents endroits dans le faisceau. Ces positions sont indiquées sur la figure III.2.1.

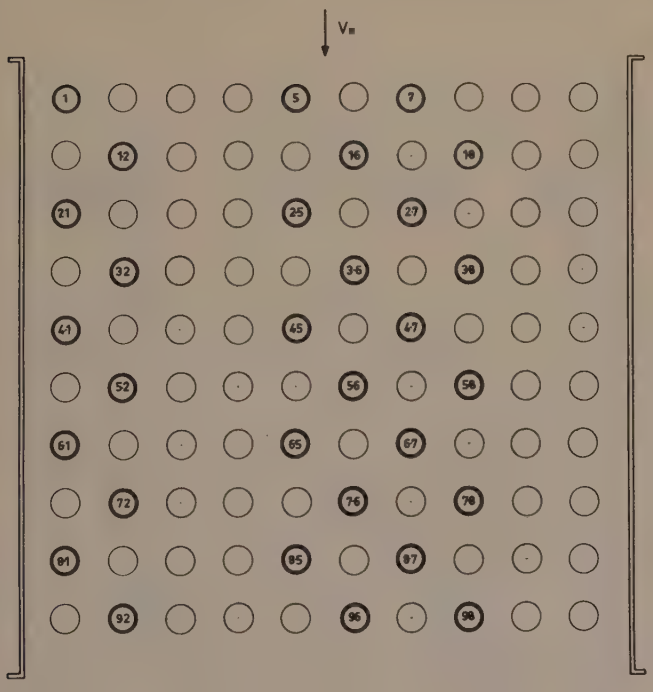


Figure III.2.1 - Mesure de pression à la paroi des cylindres - position de la tête de mesure.

Figure III.2.2 - Un des tubes modifiés pour mesurer la pression statique au niveau d'une rangée.

La pression dans le faisceau évoluant de façon appréciable, il a fallu ensuite trouver une pression de référence par rapport à laquelle mesurer la pression à la paroi des tubes :

de cette manière il était possible d'utiliser au mieux les manomètres en notre possession (0-4 mbar et 0-10 mbar). Pour cette raison, nous avons fixé sur deux tubes mobiles des prises de pression statique de petites dimensions constituées par une antenne dirigée dans le sens de l'écoulement, à peu près à égale distance de deux tubes voisins à hauteur de l'étranglement. Les orifices de prise de pression, au nombre de six, sont répartis autour du cylindre de 1 mm de diamètre à une distance de 3 mm de son extrémité hémisphérique. Ces petites sondes ont été brasées à la paroi des cylindres du faisceau et raccordés à un tube en acier inoxydable cheminant dans l'écoulement d'eau avant d'émerger à l'extérieur par le carré de fixation. Un de ces cylindres mobiles est représenté par la figure III.2.2. La moyenne des deux pressions statiques mesurées au droit des deux cylindres mobiles les plus proches, situés dans la même rangée constituait la pression de référence.

L'ensemble de tous les résultats de mesure est présenté dans l'annexe V. Pour chaque cylindre, on explorait toute la surface dans un plan perpendiculaire au faisceau de 0° à 360°. Pour tous les tubes, on a pu observer une symétrie remarquable de l'écoulement, sauf pour ceux de la deuxième rangée. Nous avons représenté les résultats correspondants sur la figure III.2.3. Il ne s'agit pas d'un phénomène d'instabilité, puisque les points sont bien alignés, mais d'une asymétrie de l'écoulement due sans doute à la présence de tourbillons à l'arrière des tubes de la première rangée. Par la suite, l'énergie de ces tourbillons se transforme en énergie de turbulence qui tend à rendre symétrique l'écoulement : c'est un phénomène analogue à celui de l'uniformisation des vitesses dans une conduite par création de turbulence fine au niveau d'une grille ou d'un élément de métal déployé.

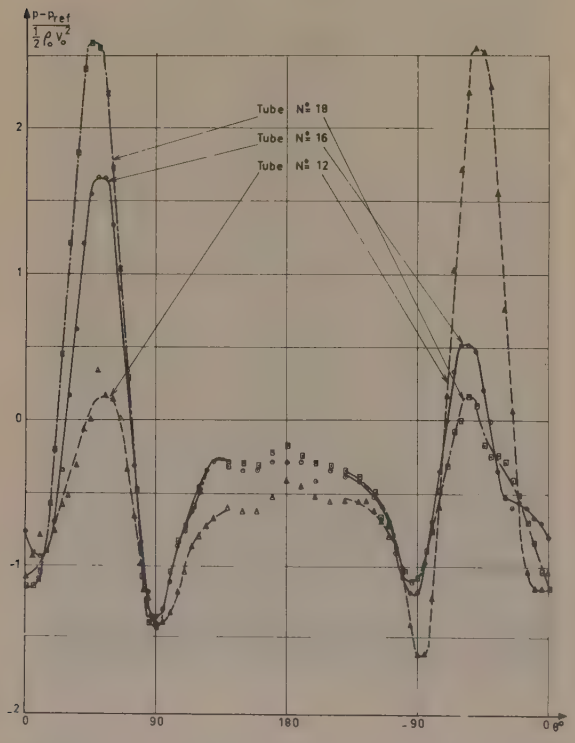


Figure III.2.3 - Pression mesurée à la paroi des tubes de la deuxième rangée (sans transfert).

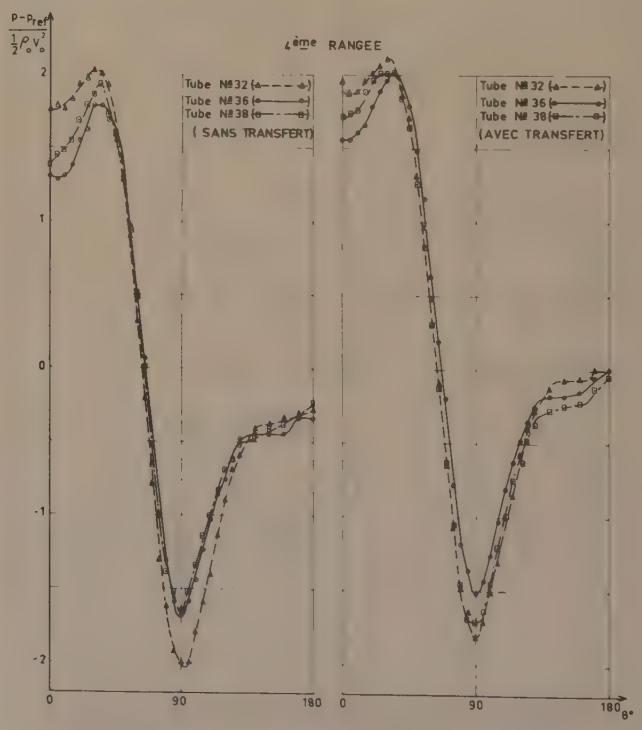


Figure III.2.4 - Pression mesurée à la paroi des tubes de la quatrième rangée.

On peut également comparer les résultats obtenus avec et sans transfert. Ils sont très voisins. Nous en donnons un exemple sur la figure III.2.4. D'une part, on peut constater que les courbes correspondant aux tubes d'une même rangée sont très proches. D'autre part, le fait d'introduire le transfert thermique en gardant (approximativement) les mêmes conditions d'écoulement, c'est-à-dire le même nombre de Reynolds, ne modifie pas de façon sensible les effets cinématiques de l'écoulement : coefficients de pression et coefficients de frottement (on vérifiera ce dernier point dans le chapitre suivant).

On utilisera les répartitions de pression à la paroi pour effectuer un calcul de couche-limite. Comme les courbes correspondant à une même rangée sont proches, on prendra une courbe moyenne pour une rangée. Pour la seconde, la courbe moyenne est très éloignée des résultats physiques et le calcul n'aura qu'un intérêt limité.

III.2.2 - MESURE DE LA TEMPÉRATURE DANS LE FAISCEAU.

Pour cette série de mesures nous avons utilisé le porte-sondes lié à la tête de mesure et une thermistance de même type que celle décrite dans le chapitre précédent. Le schéma des déplacements de la sonde est présenté sur la figure III.2.5. De cette manière, on explorait un vaste champ autour de chaque tube, sans que la thermistance soit jamais dans le sillage du porte-sonde : seule, la partie située juste à l'arrière des cylindres ne put être explorée : les indications de l'appareil étaient beaucoup trop fluctuantes.

Les opérations étaient menées en deux temps : d'abord exploration de la partie de l'écoulement située à droite de la tête de mesure, puis retournement de la sonde (rotation de la couronne B d'un angle supérieur à 180°) et exploration de la seconde partie de l'écoulement. La manoeuvre de retournement, assez délicate, puisqu'il fallait éviter tout contact de la thermistance avec les autres tubes du faisceau, se faisait en suivant le trajet de la sonde grâce au repère en plexiglass fixé à la partie supérieure de la tête de mesure.

On a fait subir à la sonde deux étalonnages, l'un avant, l'autre après les mesures. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous. Un décalage assez net de 4 à 5°C s'est produit. Nous avons convenu d'appliquer les résultats du premier étalonnage aux mesures effectuées sur l'échangeur dans sa position initiale et ceux du second aux mesures effectuées après retournement de l'échangeur.

I	N *	177	273	374	534	642	748	829	951
	T	133,83°	137,50°	141,68°	149,03°	154,59°	160,70°	165,62°	174,22°
II	N	422,5	510	514	615	708	786	875	941
	T	147,10°	151,17°	151,42°	156,72°	162,12°	167,16°	173,17°	178,79°

* indication du potentiomètre.

Les variations des caractéristiques de la sonde ne nous ont pas permis de faire la carte des températures dans l'ensemble de la région explorée (représentée sur la figure III.2.6), mais nous avons dû nous limiter à l'examen local des répartitions de températures. L'ensemble des résultats obtenus est donné en Annexe VI.

Nous pouvons cependant tirer de ces mesures des renseignements sur le transfert à l'intérieur du faisceau : sur les figures III.2.7 et III.2.8 nous avons tracé les isothermes évalués par interpolation à partir des points de mesure dans la zone située à l'arrière de tubes de deux rangées : la première et la sixième, (de toutes façons l'allure des isothermes est la même pour toutes les rangées à partir de la troisième).

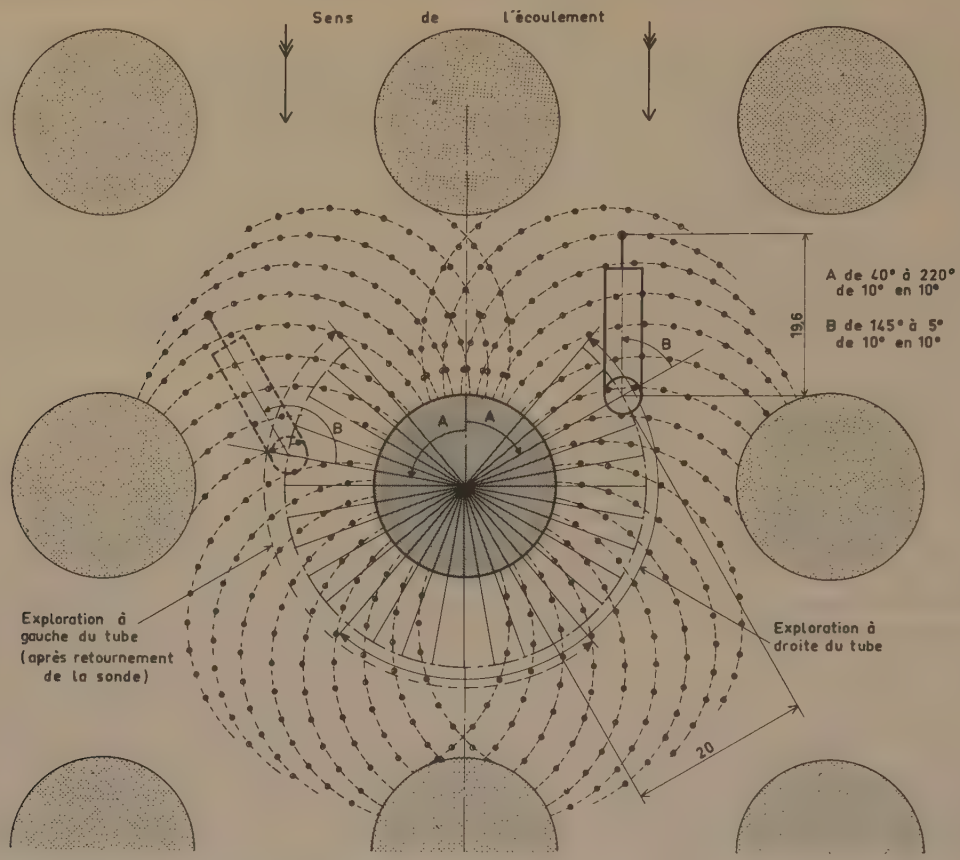


Figure III.2.5 - Région explorée par la tête de mesure autour d'un tube du faisceau.

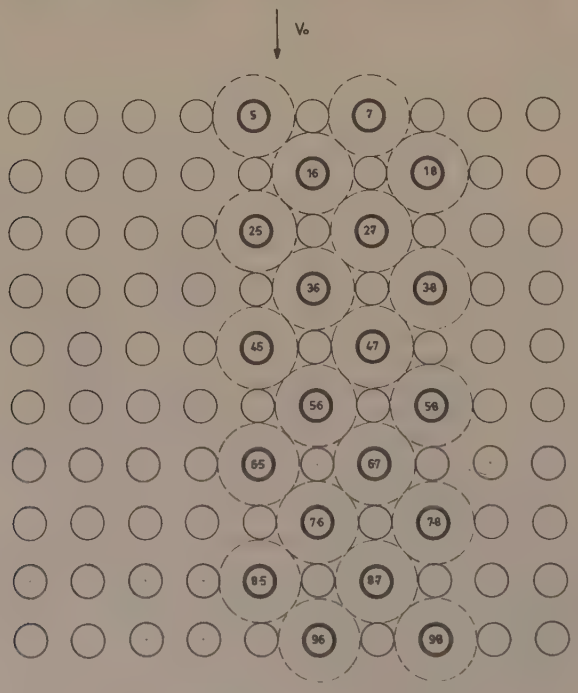


Figure III.2.6 - Mesure de la température dans le faisceau - Position de la tête de mesure et région explorée.

Les différences entre les deux dessins sont notables : sur la figure III.2.7, on a représenté les courbes tous les 5 degrés. Les gradients de température dans la zone située entre deux tubes de deux rangées voisines sont importants, alors qu'au contraire, sur la figure III.2.8, les gradients sont faibles. Il semble bien que la zone de sillage de la première rangée offre une résistance au transfert plus importante que pour les rangées suivantes. Cela peut expliquer le fait (mis en évidence dans le prochain chapitre) que le transfert du niveau de la paroi des tubes soit plus faible pour la première rangée quand on le compare au transfert intéressant les parties comportant une couche limite laminaire.

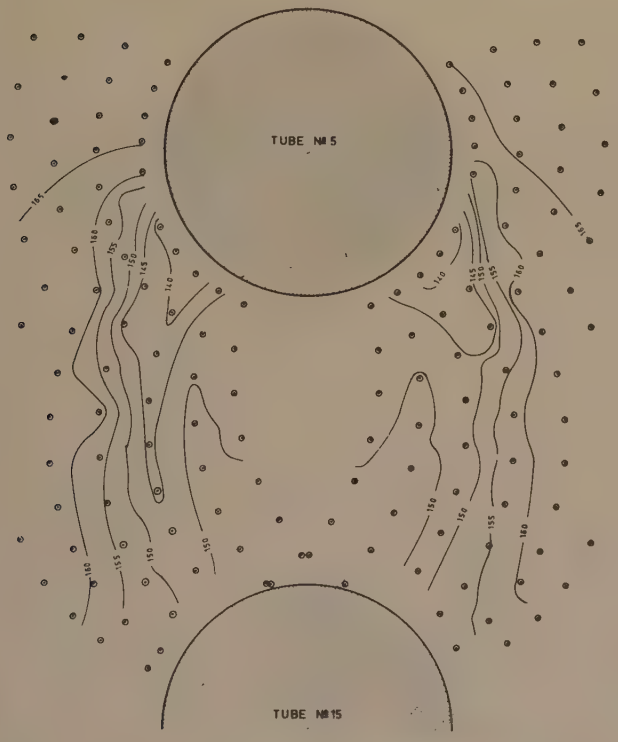


Figure III.2.7 - Réseau des isothermes à l'arrière d'un tube de la première rangée.

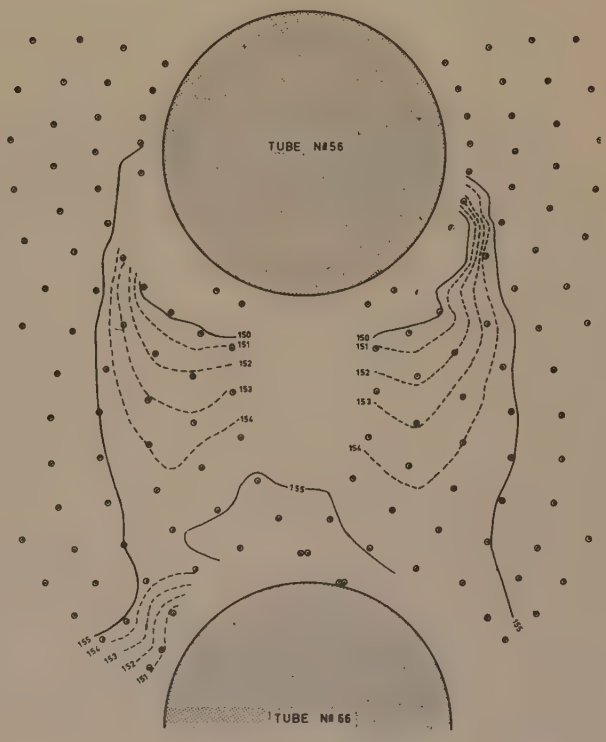


Figure III.2.8 - Réseau des isothermes à l'arrière d'un tube de la sixième rangée.

Chapitre III

Calcul de couche limite dans le faisceau

Afin d'exploiter les résultats expérimentaux obtenus, nous avons voulu appliquer aux différents cylindres du faisceau une méthode de résolution numérique de la couche limite laminaire avec propriétés physiques variables. Le programme de calcul général est sommairement décrit dans [37]. Nous allons exposer la méthode employée, appliquée au cas d'un cylindre avant d'analyser les résultats obtenus.

III.3.1 - LES ÉQUATIONS DE LA COUCHE LIMITE LAMINAIRE. LEUR TRANSFORMATION.

Les équations classiques de la couche limite s'écrivent :

Continuité : $$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \qquad (1)$$

Impulsion : $$\rho\left[u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right] = -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right) \qquad (2)$$

Energie : $$\rho\left[u\frac{\partial H}{\partial x} + v\frac{\partial H}{\partial y}\right] = \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\mu}{Pr}\frac{\partial H}{\partial y} + \mu\left(1 - \frac{1}{Pr}\right)u\frac{\partial u}{\partial y}\right] \qquad (3)$$

(Pour les notations voir figure III.3.1).

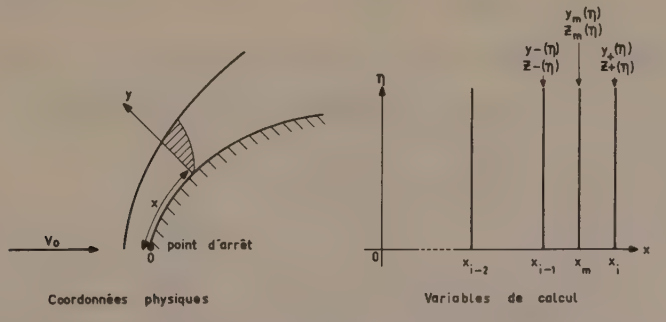


Figure III.3.1 - Notations utilisées pour le calcul de la couche-limite.

On va transformer ces équations en introduisant la fonction de courant ψ (pour éliminer (1) et se ramener à un système de deux équations) :

$$\rho u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad ; \quad \rho v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{4}$$

On va également effectuer un changement de variable :

$(x, y) \longrightarrow (x, \eta)$ défini par :

$$\eta = \sqrt{\frac{u_e}{\rho_\infty \mu_\infty x}} \int_o^y \rho(x, y)dy \tag{5}$$

d'où :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial x} & \text{devient} \quad \dfrac{\partial}{\partial x} + \left(\dfrac{\partial \eta}{\partial x}\right)_y \cdot \dfrac{\partial}{\partial \eta} \\ \dfrac{\partial}{\partial y} & \text{devient} \quad \left(\dfrac{\partial \eta}{\partial y}\right)_x \dfrac{\partial}{\partial \eta} \end{cases}$$

Les premiers membres des équations (2) et (3) sont de la forme :

$$u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} \qquad \text{avec} \qquad F = u, \ H$$

Avec les changements (4) et (5) ils deviennent :

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)_x \left[\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)_y\right] - \left[\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)_y\right] \frac{\partial F}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)_x$$

Soit après simplification :

$$\left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)_x \left[\frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial \eta}\right] = \rho \sqrt{\frac{u_e}{\rho_\infty \mu_\infty x}} \left[\frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial \eta}\right]$$

On exprimera $\frac{dp}{dx}$ en écrivant l'équation (2) à la limite extérieure de la couche limite :

$$\rho_e u_e \frac{du_e}{dx} = -\frac{dp}{dx} = \rho_e \frac{u_e^2}{x} P \qquad \text{avec} \qquad P = \frac{x}{u_e} \frac{du_e}{dx}$$

On notera par des $(\quad)'$ les différentiations partielles par rapport à η et on posera :

$$\begin{cases} \psi(x, \eta) = \sqrt{\rho_\infty \mu_\infty u_e x} \quad f(x, \eta) \\ g(x, \eta) = \dfrac{H(x, \eta)}{H_e} \end{cases}$$

Ce qui conduit notamment à :

$$u(x, \eta) = u_e \ f'(x, \eta)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x, \eta) = u_e \left[\frac{\partial f'}{\partial x} + \frac{P}{x} f'\right]$$

$$\frac{\partial u}{\partial \eta}(x, \eta) = u_e \ f''$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x}(x,\eta) = \sqrt{\frac{\rho_\infty \mu_\infty u_e}{x}} \frac{P+1}{2} \frac{\partial f}{\partial x}(x,\eta)$$

Tous calculs faits, l'équation de l'impulsion s'écrit :

$$\frac{1}{C_\infty}(Cf'')' + \frac{P+1}{2} ff'' + P\left(\frac{\rho_e}{\rho} - f'^2\right) - x\left(f' \frac{\partial f'}{\partial x} - f'' \frac{\partial f}{\partial x}\right) = 0 \qquad (7)$$

Si l'on pose :

$$C = \frac{\rho \mu}{\rho_e \mu_e} \qquad C_\infty = \frac{\rho_\infty \mu_\infty}{\rho_e \mu_e}$$

on remarque qu'en écoulement incompressible cette équation s'écrit :

$$f''' + \frac{P+1}{2} ff'' + P(1 - f'^2) - x\left(f' \frac{\partial f'}{\partial x} - f'' \frac{\partial f}{\partial x}\right) = 0$$

L'équation de l'énergie prend la forme suivante :

$$\frac{1}{C_\infty}\left[\frac{C}{Pr} g' + C\left(1 - \frac{1}{Pr}\right)\frac{u_e^2}{H_e} f'f''\right]' = -\frac{P+1}{2} fg' + x\left[f' \frac{\partial g}{\partial x} - g' \frac{\partial f}{\partial x}\right] \qquad (8)$$

Les équations (7) et (8) contiennent des dérivées partielles par rapport à x et η, mais les termes contenant des dérivées partielles par rapport à x sont multipliés par x. Pour démarrer le calcul, on aura d'abord à résoudre un système de deux équations différentielles, ce qui simplifie beaucoup le problème. Pour des questions de commodité, on fera en outre le changement de fonctions :

$$Y = f' - 1 \qquad Z = g - 1 \qquad (9)$$

ce qui nous amène au système suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{1}{C_\infty}(CY')' + \dfrac{P+1}{2}\left(\eta + \displaystyle\int_o^\eta Y d\eta + f_p\right) Y' + P\left(\dfrac{\rho_e}{\rho} - (1+Y)^2\right) \\ \qquad - x\left[(1+Y)\dfrac{\partial Y}{\partial x} - Y' \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\displaystyle\int_o^\eta Y d\eta + f_p\right)\right] = 0 \quad (10) \\ \dfrac{1}{C_\infty}\left[\dfrac{C}{Pr} Z' + C\left(1 - \dfrac{1}{Pr}\right)\dfrac{u_e^2}{H_e}(1+Y)Y'\right]' + \dfrac{P+1}{2}\left(\displaystyle\int_o^\eta Y d\eta + f_p\right) Z' \\ \qquad - x\left[(1+Y)\dfrac{\partial Z}{\partial x} - Z' \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\displaystyle\int_o^\eta Y d\eta + f_p\right)\right] = 0 \quad (11) \end{cases}$$

avec :
$$f_p = -\sqrt{\frac{\frac{\rho_\infty u_\infty}{\mu_\infty}}{x \frac{u_e}{u_\infty}}} \int_o^x \frac{\rho_p v_p}{\rho_\infty u_\infty} dx = 0 \text{ (pas de succion)}$$

Les conditions à la paroi sont les suivantes :

$$\eta = 0 \qquad \begin{cases} Y = -1 \\ Z = \dfrac{h_p}{H_\infty} - 1 \text{ (température de paroi imposée)} \end{cases}$$

$$\eta \longrightarrow \infty : \quad \begin{cases} Y = 0 \\ Z = 0 \end{cases}$$

Ce schéma de transformation des équations est celui proposé par Smith et Clutter [38], qui n'ont cependant pas utilisé la méthode de résolution exposée ci-dessous.

III.3.2 - MÉTHODE DE RÉSOLUTION NUMÉRIQUE DES ÉQUATIONS.

On procède en deux étapes successives. Tout d'abord on va transformer les équations aux dérivées partielles en équations différentielles. Pour le premier pas (x = 0), il n'y a pas de problème, ceci est déjà réalisé. Ensuite, on partage l'intervalle de variation de x : x_1, x_2 ... x_{i-1}, x_i .... et on suppose connues les fonctions $Y(\eta)$ et $Z(\eta)$ pour chacune des valeurs de x jusqu'à x_{i-1} et on remplace les dérivées partielles par rapport à x en posant :

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_{x=x_m} = \frac{F_+ - F_-}{\Delta x} = 2\,\frac{F_m - F_-}{\Delta x} \\ x_m = \frac{1}{2}\,(x_i + x_{i-1}) \end{cases}$$

On résoudra les équations au point d'abscisse x_m et l'on en déduira les valeurs de Y et Z au point x_i par :

$$\begin{cases} Y_i = 2\,Y_m - Y_{i-1} \\ Z_i = 2\,Z_m - Z_{i-1} \end{cases}$$

avant de passer au pas suivant en x.

Les deux équations différentielles ainsi obtenues sont non linéaires et couplées : les coefficients de l'équation de l'impulsion dépendent de la température et Y apparaît explicitement dans l'équation de l'énergie. On les résoudra par itération : Supposant connues des valeurs approchées Y_i et Z_i, on calcule Y_m et Z_m formées par les équations linéaires suivantes :

$$\frac{1}{C_\infty}(CY_m')' + \frac{P+1}{2}\left(\eta + \int_o^\eta Y_i\,d\eta\right) Y_m' + P\left[\frac{\rho_e}{\rho} - (1 + 2Y_m + Y_m\,Y_i)\right] - 2\,\frac{x_m}{\Delta x}\left[(1 + Y_m)(Y_i - Y_-) - Y_m' \int_o^\eta (Y_i - Y_-)\,d\eta\right] = 0 \quad (12)$$

$$\frac{1}{C_\infty}\left[\frac{C}{Pr}\,Z_m' + C\left(1 - \frac{1}{Pr}\right)\frac{u_e^2}{H_e}(1 + Y_i)\,Y_i'\right]' + \frac{P+1}{2}\,Z_m' \int_o^\eta Y_i\,d\eta - 2\,\frac{x_m}{\Delta x}\left[(1 + Y_i)(Z_m - Z_-) - Z_m' \int_n^\eta (Y_i - Y_-)\,d\eta\right] = 0 \quad (13)$$

Les valeurs Y_m et Z_m ainsi obtenues seront prises pour nouvelles valeurs de Y_i et Z_i et on poursuivra le calcul jusqu'à la convergence.

En pratique, les premières valeurs de Y_i et Z_i seront obtenues par extrapolation des fonctions calculées pour les trois pas précédents en x (sauf évidemment pour les trois premiers pas) et on fera converger successivement chacune des deux équations séparément en répétant le processus s'il y a lieu. Ceci est justifié dans la mesure où l'équation (12) ne dépend que faiblement des valeurs de Z.

La résolution des équations linéaires (12) et (13) est relativement aisée : après avoir remplacé les dérivées par rapport à η par des différences finies (on découpe l'intervalle $0 < \eta < 10$ en 200 intervalles égaux) on est ramené à l'inversion d'une matrice tridiagonale, ce que l'on fait par la méthode exposée dans Richtmyer [39].

Le programme, écrit en langage Fortran IV et traité sur ordinateur IBM 7094, est assez rapide. Environ cinq minutes de calcul sont nécessaires en moyenne pour résoudre une centaine de pas en x. Les performances ont été améliorées en utilisant pour Y_1 et Z_1 des fonctions extrapolées. Le test de convergence était fait sur deux valeurs successives de Y_1 qui ne devaient différer que d'une quantité inférieure à 10^{-6}, quel que soit η. Ceci n'était pas réalisé pour des points proches du décollement et le calcul se poursuivait sans que cette condition soit remplie. Pour pouvoir atteindre le point de décollement, on a diminué la rigueur de la condition de convergence jusqu'à 10^{-4} ou 10^{-3}.

III.3.3 - APPLICATION DE CETTE MÉTHODE AUX TUBES DU FAISCEAU, HYPOTHÈSES ET JUSTIFICATIONS.

Avant d'appliquer brutalement les résultats du paragraphe précédent, il nous faut analyser un peu l'écoulement de l'air entre les tubes du faisceau. On peut faire un certain nombre d'hypothèses que nous allons examiner successivement :

($\mathcal{H}_1$) - *Les équations de la couche limite*, écrites dans le cas de l'écoulement autour d'un obstacle isolé, *sont valables*, au moins pour une certaine portion de chacun des cylindres (nous délimitons cette portion par la suite). Cela signifie que les gradients de vitesse à l'extérieur de la couche-limite sont faibles vis à vis des gradients de vitesse dans la couche limite. Cette hypothèse n'est pas insensée : en effet, les différences de vitesse que l'on peut enregistrer dans ces deux régions sont du même ordre, mais les dimensions sont différentes : l'épaisseur de la couche limite (évaluée par le calcul) est inférieure à 0,2 mm. Par contre, la région extérieure à la couche limite ($S_T/2$) est égale au moins à 10 mm. Les gradients de vitesse sont donc dans le rapport de ces longueurs. ($\mathcal{H}_1$) se trouve ainsi justifiée.

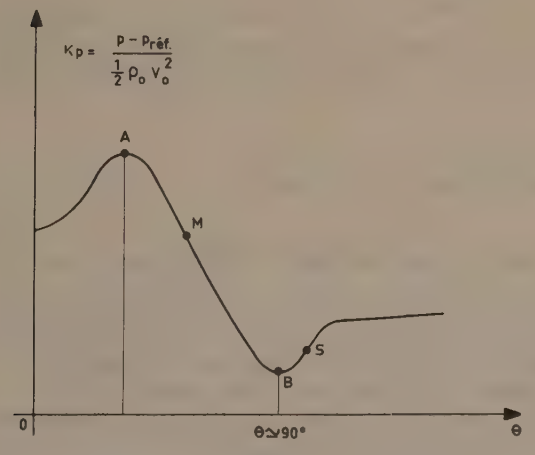


Figure III.3.2 - Pression à la paroi d'un tube intérieur au faisceau.

Pour effectuer le calcul, il faut connaître la valeur de la vitesse à l'extérieur de la couche limite. Pour l'évaluer nous allons utiliser les mesures de la pression à la paroi des tubes, dont nous avons rendu compte dans le chapitre précédent. (La forme des courbes obtenues est donnée par la figure III.3.2) en faisant les deux hypothèses suivantes :

($\mathcal{H}_2$) - *Le point A est un point d'arrêt* (vitesse nulle).

($\mathcal{H}_3$) - *La perte de pression totale* de l'écoulement entre A et S, point de séparation, *est négligeable.*

Avec ces hypothèses on peut appliquer la formule de Bernoulli (en négligeant de plus la variation de pression due à la différence de température).

$$V_M = V_o \sqrt{(K_{p_A} - K_{p_M}) \frac{\rho_o}{\rho_M}}$$

La meilleure justification de l'hypothèse ($\mathcal{H}_2$) est constituée par les résultats obtenus : le point B est un point de vitesse maximale. Or il est situé à $\theta = 90°$ et la valeur de V_B est proche de 2 V_o pour les tubes intérieurs au faisceau (à partir de la troisième rangée), ce qui est normal, étant données les dimensions géométriques de l'échangeur. Pour la première rangée de faisceau, on trouve une vitesse maximale de l'ordre de 2,5 V_o. Cela est plausible : nous avons recherché l'écoulement potentiel autour de tubes disposés en faisceau (par analogie électrique sur papier "télédeltos" : cet écoulement est proche de l'écoulement réel pour la première rangée et nous avons trouvé une vitesse maximale (à l'étranglement) de 2,9 V_o, ce qui confirme bien les mesures.

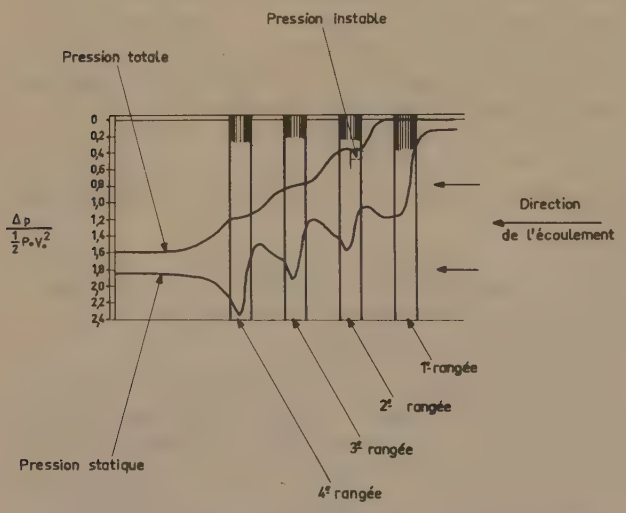


Figure III. 3. 3 - Pression à l'intérieur d'un faisceau de tubes en ligne d'après [40]

Quant à l'hypothèse ($\mathcal{H}_3$), elle est bien justifiée par les mesures de Wallis et White [40]. Les résultats en sont présentés sur la figure III. 3. 3 : la pression totale mesurée le long de l'écoulement entre deux lignes de tubes est constante approximativement à la hauteur des rangées. Ceci montre que les pertes de pression sont localisées entre les rangées. Dans ces conditions, la vitesse V_M peut bien être calculée par la formule donnée ci-dessus.

Enfin pour fixer les conditions aux limites du calcul il reste à formuler l'hypothèse suivante :

($\mathcal{H}_4$) - *Les températures à la paroi et à l'extérieur de la couche limite sont constantes.* Ceci résulte des mesures relatées dans le chapitre précédent.

III. 3. 4 - CONDUITE PRATIQUE DU CALCUL. RÉSULTATS GÉNÉRAUX.

La vitesse n'intervient pas directement, c'est le coefficient $P = \frac{x}{U_e} \frac{du_e}{dx}$ qui est utilisé pour le calcul. Il a donc fallu le calculer à partir des valeurs expérimentales de K_p. En pratique, pour chacune des rangées de tubes, nous avons pris une courbe moyenne $K_p = f(\theta)$ et nous avons approximé cette fonction par un polynôme pair du 8e degré. Il est en effet nécessaire d'avoir un polynôme de manière que P soit bien lissé. Nous avions essayé une méthode d'interpolation réalisée sur cinq points consécutifs, méthode plus précise pour K_p et V, mais qui donnait de mauvais résultats pour P.

Le calcul a été effectué pour chaque rangée, avec et sans transfert de chaleur. L'intervalle Δx était 1 degré d'arc et l'on stoppait le calcul dès que la tension pariétale était négative (le premier point après le point de décollement). Cependant, pour certains tubes, il n'a pas été possible d'atteindre le décollement : la tension pariétale passe par un minimum positif. Il est difficile d'affirmer que cela correspond à une réalité physique. Il est plus probable que cela est dû à des erreurs dans les données expérimentales.

L'ensemble des résultats obtenus est donné par l'annexe VII. Les résultats de la rangée n° 2 n'ont qu'une valeur indicative, puisque la fonction $K_p = f(\theta)$ prise pour faire le calcul n'est qu'une moyenne des mesures asymétriques dont on a rendu compte dans

le chapitre précédent. Outre les courbes tracées en annexe le programme de calcul fournissait les différentes épaisseurs de couche limite à la paroi des cylindres, déplacement, quantité de mouvement, énergie cinétique, enthalpie.

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons quelques résultats caractéristiques de ce calcul : position des points remarquables et valeur de C_f et de Nu. Les valeurs entre parenthèses ont été estimées par extrapolation.

	Point d'arrêt		Point vitesse max.		$(V/V_o)_{max}$		Point décoll^t		$(C_f)_{max} \times 10^3$		$(Nu)_{max}$
	à froid	à chaud	à froid	à chaud	à froid	à chaud	à froid	à chaud	à froid	à chaud	à chaud
1	0	0	79°	79°	2,51	2,41	(94°)	(92°)	95	78	110
2	52,6°	51,3°	88°	90°	1,74	1,80	(99°)	-	77	74	145
3	36,5°	35,3°	89°	91°	1,91	1,86	104°	102°	74,5	64	120
4	31,5°	29,9°	91°	91°	1,91	1,89	102°	102°	70	65	114
5	30,6°	28,9°	89°	90°	2,08	2,00	100°	103°	81	67	121
6	27,7°	26,9°	90°	91°	2,18	2,26	102°	103°	83	79	123
7	28,3°	28,3°	90°	92°	2,03	2,06	101°	102°	77,5	66	127
8	28,6°	27,0°	88°	90°	1,92	2,20	(102°)	104°	72	76	125
9	29,7°	29,2°	90°	91°	2,13	1,96	103°	102,5°	83,5	63	122
10	27,7°	28,3°	91°	91°	2,27	2,12	104°	102°	88	70,5	122

III.3.5 - ANALYSE DU TRANSFERT THERMIQUE DANS LE FAISCEAU.

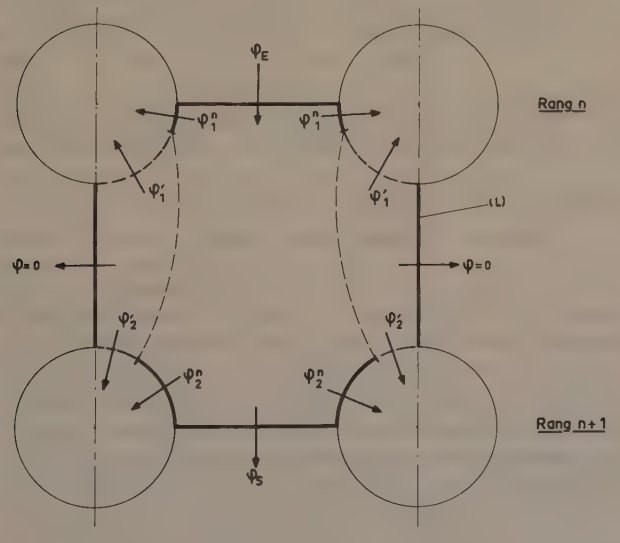


Figure III.3.4 - Les transferts thermiques dans le faisceau.

Au moyen du calcul de couche limite, on a une évaluation de la quantité de chaleur cédée aux tubes, mais sur une faible portion de leur surface : celle sur laquelle se forme une couche limite. Cependant, à partir de là, on peut essayer d'apprécier la part que prend dans le transfert le reste de la surface des tubes, c'est-à-dire la partie avant et la partie arrière.

Considérons en effet la figure III.3.4 sur laquelle sont représentés quatre tubes voisins du faisceau. Nous allons faire un bilan thermique dans l'espace délimité par la ligne (L) formée par les lignes droites joignant les centres des cylindres et une portion de la surface des cylindres. En désignant par φ les flux thermiques (par unité de longueur des tubes) il vient :

$$\varphi_E - \varphi_S = 2\varphi_1^N + 2\varphi_2^N + \sum (\varphi_1' + \varphi_2')$$

φ_E et φ_S sont facilement accessibles,

puisque l'on connaît la température dans l'espace compris entre les tubes : on peut admettre de plus que la vitesse est constante et égale à 2 V_o. En fait, on prendra pour $\varphi_E - \varphi_S$ la moyenne de la quantité $2\rho C_p V_o \Delta T$ calculée pour chaque rangée.

Dans le cas présent, cela nous donne :

$$\frac{\varphi_E - \varphi_S}{2} = 644 \text{ w/m}$$

Les quantités φ_1^N et φ_2^N peuvent être calculées à partir des résultats du paragraphe précédent :

$$\varphi_1^N = \int \lambda \frac{\partial T}{\partial y} dx = \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right)_{\text{moyen}} . \Delta x$$

De cette manière, on peut alors calculer $\varphi'_1 + \varphi'_2$

Le tableau ci-dessous rend compte des résultats obtenus.

N.B. - On note par K_φ le rapport (exprimé en %) $2 \frac{\varphi_1^N + \varphi_2^N}{\varphi_E - \varphi_S}$

$K_{\Delta x}$ le rapport (exprimé en %) de $(\Delta x)_1^N + (\Delta x)_2^N$ à la surface d'échange totale.

N	$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right)_1^N . 10^{-3}$	$(\Delta x)_1^N . 10^3$	φ_1^N	$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right)_2^N . 10^{-3}$	$(\Delta x)_2^N . 10^3$	φ_2^N	$\varphi_1^N + \varphi_2^N$	K_φ(%)	$K_{\Delta x}$(%)	$K_\varphi / K_{\Delta x}$
1	-	0	0	34,2	6,8	232	232	36	21,5	1,68
2	19,0	2,2	41,8	27,8	9,6	267	309	48	37,5	$1,28_5$
3	15,8	2,3	36,3	27,0	10,3	278	314	49	40	1,22
4	16,2	2,1	34,0	26,6	10,6	282	316	49	40	1,22
5	15,3	2,3	35,2	26,4	11,2	296	331	51,5	43	$1,20_5$
6	17,2	1,4	24,1	26,2	10,8	283	307	48	39	1,24
7	15,2	2,1	32,0	26,6	11,0	293	325	50,5	41,5	$1,21_5$
8	16,8	1,8	30,2	24,4	10,6	259	289	45	39	$1,15_5$

K_φ représente la part prise par la couche limite laminaire dans l'échange de chaleur de l'écoulement d'air vers les tubes de la rangée considérée. On peut remarquer que K_φ est toujours voisin de 50 % sauf pour N = 1. Mais cet échange partiel a lieu uniquement à travers une partie de la surface totale d'échange. Le pourcentage de la surface intéressée par cet échange par couche limite laminaire à la surface totale d'échange est donnée par $K_{\Delta x}$. On peut dire que le rapport $K_\varphi / K_{\Delta x}$, donné par la dernière colonne du tableau, représente le rapport du coefficient moyen d'échange dans la zone de couche limite laminaire au coefficient moyen d'échange pour les autres parties des tubes (amont et aval). Ce rapport est remarquablement constant pour N > 3 et égal à 1,22 environ, ce qui est nettement supérieur à 1.

Or, pour un tube isolé, le coefficient local d'échange décroît brutalement au point de décollement : les chiffres ci-dessous sont donnés pour un nombre de Reynolds de 10^4 :

	(Nu) local
0°	330
90°	100
180°	380

Si on calcule, à partir de la répartition des coefficients locaux, des coefficients moyens pour les régions situées à l'amont et à l'aval ainsi que pour les faces latérales, on voit que ces dernières ont un coefficient plus faible.

Ceci semble en contradiction avec les résultats précédents. On peut en donner une explication : en fait, le transfert thermique vers les parties avant et arrière des cylindres se fait en deux temps : diffusion de la chaleur de l'écoulement principal avec un coefficient d'échange sans doute faible, puis transfert au niveau de la surface des tubes avec un coefficient sans doute au moins égal au coefficient "laminaire", mais avec une différence de température plus faible. Ceci peut expliquer que l'on a $K_\varphi/K_{\Delta x} > 1$. Pour les premières rangées, ce phénomène est encore accentué : $K_\varphi/K_{\Delta x} = 1,68$ et $1,28$ car le transfert par diffusion se fait dans des conditions encore moins bonnes : l'écoulement n'est pas encore assez turbulent.

Ces calculs ont été effectués en supposant $\varphi_g - \varphi_s$ constant pour les différentes rangées. En fait, les différents expérimentateurs ont noté que la quantité de chaleur transférée aux deux premières rangées du faisceau était moins importante. Si l'on tient compte de ce fait, le rapport $K_\varphi/K_{\Delta x}$ serait encore plus important que nous ne l'avons dit, pour ces deux rangées.

Cependant l'ensemble de ces résultats demanderait une confirmation expérimentale. Il ne faut pas oublier que les calculs ont été effectués à partir des mesures de pression à la paroi des cylindres, qui ne donnent en fait que des valeurs moyennes. En particulier, un phénomène d'oscillation de la vitesse dans le plan de l'écoulement aura pu rendre moins importante la diminution des coefficients au niveau des points de décollement.

III.3.6 - COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC ET SANS TRANSFERT THERMIQUE. ÉVOLUTION DE L'ÉCOULEMENT DANS LE FAISCEAU.

Les mesures réalisées dans le faisceau avec et sans transfert thermique ont été faites à des nombres de Reynolds voisins $\left(\frac{V_0 D}{\nu} \simeq 11\,000\right)$. Les régimes d'écoulement sont donc en principe les mêmes. Considérons maintenant le tableau du paragraphe III.3.4. On remarque que les positions des points remarquables : points d'arrêt et de décollement, sont les mêmes avec et sans transfert. Mais également les coefficients de frottement locaux sont très voisins (voir les courbes en Annexe VII). Lorsqu'il y a une différence, il semble qu'elle soit induite par une différence des vitesses à l'extérieur de la couche limite calculées à partir des pressions mesurées à la paroi. En effet, cette différence pour les C_f est, soit faible, soit dans le même sens que la différence constatée pour les vitesses. Autrement dit, le fait qu'il y ait transfert thermique et variation des grandeurs ρ et μ n'a pas une influence prépondérante pour les coefficients de frottement.

Ceci constitue une justification à la méthode mise au point par London pour évaluer les coefficients de transfert dans les faisceaux [19, 20] et dont nous avons rendu compte dans le paragraphe 1.3.1. On peut très bien utiliser un écoulement isotherme et évaluer

le coefficient de transfert d'un tube pris isolément sans représenter l'ensemble des transferts dans le faisceau. Et le coefficient de frottement global n'est pas affecté par les échanges de chaleur.

L'analyse de l'ensemble des résultats suggère également une autre remarque : à partir du troisième rang, les différentes caractéristiques de l'écoulement sont très voisines. Les points d'arrêt et de décollement sont aux alentours de $\theta = 30°$ et 103°, C_f et Nu sont voisins de $75,10^{-3}$ et 122 respectivement. Il s'est établi un régime permanent, ce qui est encore confirmé par les résultats du paragraphe précédent. Cette mise en régime est réalisée dans les deux ou trois premières rangées du faisceau qui ont de mauvaises performances pour les échanges : C_f important et Nu faible.

III.3.7 - CONCLUSIONS.

Les résultats expérimentaux obtenus dans le faisceau ont été très limités. Le calcul de couche limite a pu donner des résultats assez intéressants, surtout en ce qui concerne la part respective prise par les zones à couche limite et les zones situées en dehors de l'écoulement principal. Il aurait été intéressant de confirmer les calculs de coefficients de transfert par des mesures de flux thermique à la paroi des cylindres. Malheureusement, nous nous sommes heurté à des difficultés considérables pour la réalisation pratique de ces mesures : les jauges de température de faibles dimensions et de sensibilité acceptable (jauges au silicium) sont très fragiles et il ne nous a pas été possible de les mettre en place sans les briser .... ou sans dépecer complètement le cylindre, ce qui aurait faussé complètement les données physiques du problème.

CONCLUSIONS

Les différents résultats des études dont nous avons rendu compte sont relatifs à un seul type d'échangeur qui a fonctionné à un nombre de Reynolds constant : cependant nous pouvons en tirer suffisamment de renseignements pour améliorer les méthodes de calcul actuellement employées.

Ces méthodes globales reposent sur l'utilisation de la formule suivante :

$$\Phi = K.S.\Delta\theta$$

Φ = Flux thermique global.

K = Coefficient global de transmission.

S = Surface totale d'échange.

$\Delta\theta$ = est une différence de température "moyenne" entre les deux fluides.

Dans un échangeur, Φ et S sont des grandeurs physiques bien déterminées : K et $\Delta\theta$, par contre, dépendent des conventions utilisées. En général, on définit $\Delta\theta$ par analogie avec les échangeurs à courants parallèles : si on admet que le coefficient d'échange local le long de ces échangeurs (défini par la différence de température locale entre les deux fluides) est constant, alors la formule donnée ci-dessus est valable, à condition de prendre pour $\Delta\theta$ la moyenne logarithmique des différences de température entre les deux fluides à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.

Mais, pour un échangeur à courants croisés, il en va différemment : le coefficient local d'échange ne peut plus être considéré comme constant, car les conditions de l'écoulement dans les premières rangées du faisceau sont différentes : de plus, la différence de température entre les deux fluides n'est plus une fonction continue. Pour utiliser quand même la formule fondamentale, on a alors recours à divers artifices : on corrige la différence de température $\Delta\theta$ par des facteurs appliqués à la différence logarithmique correspondant à des courants parallèles. Un nombre important d'abaques ont été ainsi établis, correspondant à différentes configurations : fluide à un ou plusieurs passages, avec ou sans mélange intermédiaire, etc. De la même manière, on corrige le facteur K par un coefficient tenant compte du nombre de rangées des tubes. Il faut signaler également la difficulté que l'on a à définir un nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement autour des tubes : certains auteurs prennent le diamètre des tubes, d'autres un rayon ou un diamètre hydrauliques pour longueur de définition. Pour la vitesse, on a le choix entre vitesse d'approche et vitesse dans la section minimale, on peut prendre des vitesses massiques ou non .... De toutes façons, l'intérêt de la formule qui résidait surtout dans sa simplicité disparaît devant la grande complexité des opérations à effectuer pour l'utiliser. Nous allons essayer de voir de quelle manière on peut envisager une transformation de cette méthode de calcul.

Au lieu de rechercher un coefficient d'échange global, on pourrait utiliser un coefficient moyen pour un tube fonction du nombre de Reynolds et dépendant de la forme géométrique du faisceau. Cela est justifié par le fait que ce coefficient est constant pour tous les tubes, sauf ceux des premières rangées, auxquels on pourrait d'ailleurs appliquer un facteur correctif qui serait sans doute presque indépendant de la disposition du faisceau.

A partir de ce coefficient, il serait alors possible de faire un calcul pas à pas, rangée par rangée, en tenant compte de l'évolution de la température du fluide extérieur aux tubes et du fluide intérieur aux tubes (cas de plusieurs passages par exemple). Evidemment, cela représente un calcul plus compliqué, mais qui est facilement programmé sur une calculatrice moderne.

Quels sont les intérêts d'une telle méthode ? Tout d'abord, du point de vue calcul de l'échangeur, il est possible de prendre des répartitions quelconques de température pour les parois des tubes sans avoir besoin de recourir à des formules approximatives, qui en général ne s'appliquent pas exactement au cas traité. De plus, tout au long de ce calcul, on reste très près des réalités physiques : on peut à chaque instant connaître avec une précision acceptable la valeur de la température, par exemple, ou la valeur de la densité du flux thermique (ceci est particulièrement important lorsqu'il y a changement de phase pour un des fluides). On peut alors avoir connaissance de certaines particularités locales de l'écoulement (points à température maximale ou à densité de flux minimal) qui auraient pu passer inaperçues dans un calcul global.

Cependant, lors du calcul pas à pas de l'échangeur, on est amené à faire varier la température du fluide en fonction des calculs précédents en prenant, par exemple, comme température à l'amont de la rangée N, la température de mélange résultant du calcul de l'échange au niveau de la rangée N - 1. Ceci est approximatif, puisque le mélange n'est pas réalisé et que le fluide "extérieur à la couche limite" est à une température différente de la température de mélange (par exemple, sur la figure III.2.8, le tube n° 56 est entouré d'air dont la température varie de 155°C à 150°C alors que la température de mélange est d'environ 155°C). Mais nous allons voir que cette approximation est justifiée.

On peut en effet calculer grossièrement la température de paroi extérieure du tube. Nous connaissons le flux thermique relatif à un tube : 644 w (pour un mètre de tube). Le coefficient d'échange côté eau (0,1 m/s d'eau à 15°C) peut être évalué : 790 $w/m^2.deg$. En tenant compte de l'épaisseur de la paroi (2 mm) en acier inoxydable, nous trouvons un coefficient d'échange côté air rapporté à la surface extérieure du tube, de 85 $w/m^2.deg.$, ce qui donne une température de paroi de 35°C environ. La différence de température qui intervient dans le calcul des densités de flux est donc de l'ordre de 120°C, et une erreur de 5°C dans l'estimation de la température de l'air (température de mélange ou température à l'extérieur de la couche limite) est négligeable.

Du point de vue calcul, on pourra donc sans crainte évaluer les performances globales d'un échangeur à partir des coefficients locaux et des températures de mélange successives.

D'un point de vue expérimental, cette méthode peut contribuer à simplifier les essais. On pourra s'attacher à déterminer uniquement les coefficients individuels.

D'ailleurs, pour effectuer un calcul approximatif (dans le cadre, par exemple, d'une étude prévisionnelle), on peut fort bien utiliser les résultats de la plaque plane qui a pu être calculée de façon exacte :

$$Nu = 0,664 \sqrt{Re}\ Pr^{1/3}$$

On peut en effet comparer à cette formule une de celles préconisées pour les échangeurs "en ligne" :

$$Nu = 0.2\ Re^{0,64}\ Pr^{0,35}$$ (formule donnée dans [*]).

Cette formule est équivalente, dans la gamme de nombres de Reynolds compris entre 10^4 et 10^5, à une formule du type :

$$Nu = k\ \sqrt{Re}\ Pr^{1/3},$$ à condition de prendre $0,72 < k < 1$.

Les nombres adimensionnels sont déterminés à partir du diamètre des tubes et de la vitesse maximale dans le faisceau. Si on raisonne comme pour une plaque plane, avec une dimension comparable ($\pi D/2$ au lieu de D) le coefficient k doit alors être tel que :

$$0,57 < k < 0,79$$

On voit ainsi que les coefficients que l'on peut calculer à partir de la théorie de la plaque plane appliquée aux différentes parties de l'échangeur constituent une excellente base de départ pour un calcul approché.

Par la suite, on pourra toujours améliorer cette méthode en évaluant les coefficients d'échange locaux de façon plus précise, par exemple à partir de la théorie de la couche limite, comme nous avons pu le faire dans cette étude.

(*) KUTATELADZE ; BORISHANSKII - A concise encyclopedia of heat transfer, *Pergamon Press* (1966).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] R. COMOLET - Mécanique Expérimentale des Fluides, t.II, 1963. *Masson & Cie* Paris.

[2] S. GOLDSTEIN - Modern Developments in Fluid Dynamics, t.II, 1950 - *Clarendon Press*, Oxford.

[3] A. FAGE, W.M. FALKNER - Further Experiments on the flow around a circular cylinder - *A.R.C R & M.*, n° 1369, febr. 1931.

[4] A. FAGE, F.C. JOHANSEN - The Structure of Vortex Sheets - *Phil. Mag.* S. 7. Vol. 5, n° 28, feb. 1928 pp. 417-441.

[5] SCHILLER, LINKE - Zeitschr. f. Flugtechn. u. Motor Luftschiffahrt, 24 (1933) 193-193, cité dans [2] page 555.

[6] H. SCHLICHTING - Uber das ebene Windschattenproblem - *Ingenieur-Archiv*, I Band (1930) pp. 533-571.

[7] A. FAGE, V.M. FALKNER - Note on Experiments on the Temperature and Velocity in the Wake of a Heated Cylindrical Obstacle. *Proc. Royal Society*, London, A, (1932) pp. 702-705.

[8] A. ROSHKO - On the Drag and Shedding Frequency of two dimensional Bluff Bodies *N.A.C.A. TN.* n° 3169 (1954).

[9] A. ROSHKO - A New Hodograph for Free-Streamline Theory - *N.A.C.A. TN* n° 3168 (1954).

[10] D. RIABOUCHINSKY - On steady Fluid Motions with Free Surfaces. *Proc. London Math. Soc.* 1920, 19 pp. 206-215.

[11] L.C. WOODS - Two Dimensional Flow of a Compressible Fluid past given curved Obstacles with infinite Wakes - *Proc. of the Royal Society*, London, A, n° 1170, 20 Jan. 1955, vol. 277, pp. 369-386.

[12] T. YAO-TSU WU - A Wake Model for free Streamline Flow theory - *Journal of Fluid Mechanics*, 1962, vol 13, pp. 161-181.

[13] A. ACRIVOS et Al. - The Steady separated flow past a circular cylinder at large Reynolds number - *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, vol. 21. pp. 737-760.

[14] A.S. GROVE - An investigation into the nature of steady separated flows at large Reynolds numbers - *University of California* - Berkeley, Ph. D. 1963.

[15] O.L. PIERSON - Experimental Investigation of the Influence of Tube - Arrangement on Convection Heat Transfer and Flow Resistance in Cross Flow of gases over Tube Banks - *Transactions of Am. Soc. of Mech. Engineers*, 1937, vol. 59, pp. 563-572.

[16] E.C. HUGE - Experimental Investigation of Effects of Equipment Size on Convection Heat Transfer and Flow Resistance in Cross Flow of gases over Tube Banks - *Transactions of Am. Soc. of Mech. Engineers*, 1937, vol. 59, pp. 573-582.

[17] E.D. GRIMISON - Correlation and Utilization of New Data on Flow Resistance and Heat Transfer for Cross Flow of gases over Tube Banks - *Transactions of Am. Soc. of Mech. Engineers*, 1937, vol. 59, pp. 583-594.

[18] P. BERGELIN et al. - Heat Transfer and Fluid Friction during Flow across Banks of Tubes - IV - *Transactions of Am. Soc. of Mech. Engineers*, 1952, vol. 74, pp. 953-960.

[19] A.L. LONDON et al. - Determination of Unit Conductances for Heat and Mass Transfer by the Transient Method - *Industrial and Engineering Chemistry*, vol 33, 1941, p. 467.

[20] W.M. KAYS, A. L. LONDON, R.K. LO - Heat Transfer and Friction Characteristics for Flow normal to Tube Banks - Use of Transient - Test Technique - *Transactions of Am. Soc. of Mech. Engineers*, 1954, vol. 76, pp. 387-396.

[21] R. BOUSSON, R. DOUSSAIN - Essais en régime variable de faisceaux tubulaires quinconcés - *Inst. Fr. du Comb. et de l'Energie*, Journées de la transmission de la chaleur, 1961, pp. 1155-1166.

[22] C.E. JONES, E.B. MONROE Jr - Convection Heat Transfer and Pressure Drop of Air Flowing Across In-line Tube Banks. Part I - Apparatus, Procedures and Special Effects - *Transactions of Am. Soc. of Mech. Engineers*, 1958, vol. 80, pp. 18-24.

[23] A.J. GRAM, C.O. MACKEY, E.B. MONROE Jr - Convection Heat Transfer and Pressure Drop of Air Flowing Across In-line Tube Banks - Part II - Correlations of Data for Ten-Row Drop Tube Banks. *Transactions of Am. Soc. of Mech. Engineers*, 1958, vol. 80, pp. 25-35.

[24] H.N. FAIRCHILD, C.P. WELCH - Convection Heat Transfer and Pressure Drop of Air Flowing Across In-Line Tube Banks at close Back Spacings - Publication of the *Am. Soc. of Mech Engineers*, Paper n° 61 - W A-250, 1961.

[25] R.C. BAIRD - Pulsation Induced Vibration in Utility Steam Generation Units - *Combustion* - April 1954, pp. 38-44.

[26] B.J. GROTZ, F.R. ARNOLD - Flow Induced Vibrations in Heat Exchangers - Technical Report n° 31, NR - 065 - 104 for *Office of Naval Research* - August 1956.

[27] V.I. MAKAREVICIUS, A. ZUKAUSKAS - (Détermination du profil de vitesse d'un écoulement dans la section de passage minimum d'un faisceau tubulaire) - *Liet T.S.R. Mokstu Akad. Darbai.* série E 1962, 4, 31, pp. 137 - 144 - (Traduction C.R.E.C n° 1178.)

[28] V.I. MAKAREVICIUS, A. ZUKAUSKAS - (Etude de la transmission calorifique locale des tubes de faisceaux avec prédominance d'un écoulement laminaire). - *Liet T.S.R. Mokstu Akad Darbai.* Série B, 1962 4, 31, pp. 145-157, (Traduction C.R.E.C n° 1179).

[29] A. SLANCIAUSKAS, A. ZUKAUSKAS - (A propos du choix de la vitesse déterminante et de l'influence d'une rangée avancée servant de générateur de turbulence, sur l'échange calorifique dans un faisceau tubulaire). - *Liet T.S.R. Mokstu Akad Darbai*. Série B, 1962, 4, 31, pp. 157-161 (Traduction C.R.E.C n° 1180.

[40] J. FAURE, R. ROUDIER - Flow patterns in boilers - Proceedings of the Eastbourne Conference (Fuel Research and Development) - October 1965, p. 173-194, *The Institute of Fuel, London.*

[31] S. TACCOEN - Etude de la diffusion turbulente de la chaleur dans un tube lisse. Thèse Docteur-Ingénieur - *Faculté des Sciences-Paris*, 1966.

[32] L.V. KING - On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid : determination of the convection constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry. *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, ser. A, vol.214, 1914, p.373.

[33] S. CORRSIN - Extended applications of the hot-wire anemometer. *NACA T.N. 1864* - April 1949.

[34] S. CORRSIN, M.S. UBEROI - Spectra and diffusion in a round turbulent jet - *NACA Report n° 1040* August 1949.

[35] T. LE MARÉCHAL - Une soufflerie chaude (500°C) à veine libre pour étalonnages - *Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou* n° 9, 1964.

[36] J.J. MILL, A.P. MILLER - An a.c. double bridge with inductively coupled ratio arms for precision platinum resistance thermometry - *Proceedings I.E.E*, vol.110, n° 2, February 1963, p. 453-58.

[37] T. LE MARÉCHAL, J. RONAT - Une méthode de résolution numérique des équations de la couche-limite laminaire compressible bidimensionnelle - *C.R. Acad. Sc. Paris*, t 262, p 512-515, 28 Février 1966.

[38] A.M.O. SMITH, D.W. CLUTTER - Machine calculation of compressible laminar boundary layers - *A.I.A.A. Journal*, 3, n° 4, 1965, p.639-647.

[39] R.D. RICHTMYER - Difference methods for initial value problems, *Interscience Publishers Inc.*, New-York (1957), 238 p.

[40] R. PENDENNIS WALLIS, C.M. WHITE - Resistance to flow through nests of tubes - *Engineering*, vol.146, 25 Novembre 1938,. p. 605-7, 9 Décembre 1938 p. 665-6 et 23 Décembre 1938 p. 723-5.

[41] J. FROMM - The Time dependent flow of an incompressible viscous fluid. - Methods in computational physics, 3, p. 345, 1964, *Academic Press*.

ANNEXES

ANNEXE I - TEMPÉRATURE DANS LE SILLAGE DU TUBE ISOLÉ (FIL DE PLATINE) - V_o = 25,6 m/s – Re = 20 000

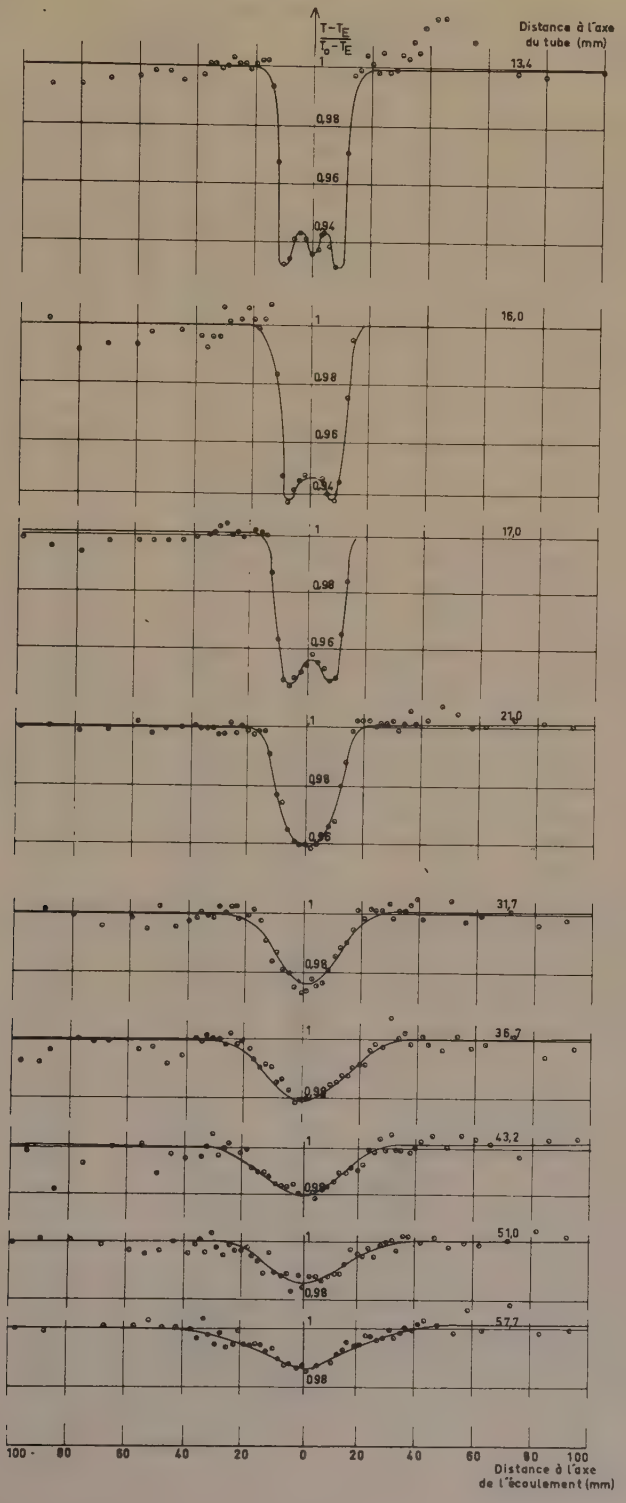
I - Résultats expérimentaux

Température de l'écoulement	178° C	177° C	180,5°C	184° C	185° C	177°,5 C	177° C	176° C	178,5° C
Distance à l'axe du tube	13,4 mm	16 mm	17 mm	21 mm	31,7 mm	36,7 mm	43,2 mm	51 mm	57,7 mm

Distance à l'axe de l'écoulement (mm)	$\frac{T - T_E}{T_o - T_E}$ (T_E = température de l'eau de refroidissement) (T_o = température de l'écoulement non perturbé)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,995	1,010	0,997	1,001	1,007	1,004	(0,987)	1,001	0,999
80	0,995	0,999	0,995	0,999	1,005	1,008	0,996	1,001	-
70	0,997	1,001	0,999	0,999	1,001	1,007	1,002	0,999	1,001
60	0,998	1,001	0,999	1,002	1,004	1,004	1,003	0,997	1,001
55	1,000	1,005	0,999	0,998	1,000	1,005	0,992	0,996	1,003
50	1,000	1,013	0,999	1,000	1,008	0,999	0,999	0,997	1,001
45	0,997	1,006	0,999	1,000	1,001	1,002	0,998	1,000	1,001
40	1,007	0,995	1,000	1,001	1,003	1,008	0,998	0,996	1,000
38	0,999	1,004	0,999	1,000	1,004	1,007	1,002	0,999	0,997
36	1,003	1,000	1,001	1,000	1,006	1,009	1,006	1,002	1,004
34	1,003	1,004	1,002	1,000	1,005	1,008	0,999	0,996	0,998
32	1,001	1,004	1,004	0,998	1,004	1,008	1,001	1,003	0,995
30	1,002	1,014	1,005	0,998	1,008	1,006	1,003	0,998	0,999
28	1,005	1,009	1,001	1,002	1,006	1,010	0,999	0,995	0,994
26	1,003	1,012	1,002	0,998	1,008	1,006	1,000	0,999	0,995
24	1,003	1,010	1,000	1,000	1,008	1,007	1,001	0,997	1,000
22	1,001	1,014	1,006	0,999	1,004	1,004	0,995	0,997	0,995
20	1,003	1,010	1,003	0,998	1,005	1,001	0,993	0,998	0,995
18	1,004	1,007	1,002	0,999	1,007	0,998	0,993	0,995	0,995
16	1,004	1,010	1,001	0,999	1,003	0,999	0,992	0,993	0,995
14	0,995	1,015	0,988	0,991	0,996	0,998	0,989	0,989	0,993
12	0,969	0,991	0,965	0,977	0,989	0,993	0,988	0,996	0,994
10	0,934	0,956	0,951	0,974	0,992	0,994	0,988	0,989	0,990
8	0,936	0,947	0,949	0,965	0,986	0,990	0,989	0,988	0,988
6	0,943	0,951	0,952	0,961	0,985	0,986	0,986	0,989	0,989
4	0,945	0,954	0,954	0,960	0,980	0,987	0,983	0,983	0,987
2	0,943	0,956	0,956	0,960	0,978	0,987	0,986	0,988	0,988
0	0,937	0,970	0,960	0,958	0,979	0,984	0,984	0,984	0,986
- 2	0,939	0,965	0,957	0,960	0,983	0,991	0,980	0,988	0,987
- 4	0,945	0,955	0,955	0,963	0,981	0,988	0,988	0,988	0,988
- 6	0,940	0,948	0,951	0,966	0,982	0,992	0,990	0,987	0,989
- 8	0,933	0,947	0,952	0,968	0,986	0,993	0,993	0,988	0,989
- 10	0,933	0,954	0,967	0,980	0,991	0,995	0,993	0,989	0,992
- 12	0,972	0,983	0,985	0,988	0,994	0,995	0,995	0,989	0,993
- 14	0,999	1,003	1,004	0,999	0,996	0,998	0,994	0,999	0,996
- 16	1,001	1,019	1,007	1,003	1,000	0,999	0,996	0,997	0,995
- 18	1,011	-	1,008	1,003	1,007	0,999	1,001	0,996	0,995
- 20	1,003	-	1,007	1,003	1,004	1,004	1,000	0,995	0,998
- 22	1,000	-	-	1,001	1,008	1,006	1,005	0,998	0,998
- 24	1,007	-	-	1,002	1,007	1,005	1,001	0,995	0,997
- 26	1,000	-	-	1,002	1,007	1,015	1,006	0,999	0,997
- 28	1,001	-	-	1,003	1,009	1,007	1,001	1,000	1,000
- 30	1,006	-	-	0,999	1,004	1,008	1,001	1,001	0,997
- 32	1,005	-	-	1,002	1,007	1,010	1,000	0,997	0,999
- 34	1,011	-	-	1,006	1,007	1,006	1,002	1,002	1,001
- 36	1,007	-	-	1,002	1,009	1,008	1,004	1,002	1,000
- 38	1,016	-	-	1,002	1,011	1,009	1,003	0,999	1,002
- 40	1,009	-	-	1,003	1,004	1,006	1,006	1,000	1,003
- 45	1,019	-	-	1,008	1,007	1,004	1,002	1,002	1,002
- 50	1,021	-	-	1,005	1,010	1,009	1,006	0,998	0,999
- 55	1,011	-	-	1,001	1,003	1,005	1,005	1,000	1,007
- 60	1,020	-	-	1,001	1,005	1,006	1,003	0,999	1,000
- 70	1,000	-	-	1,003	1,007	1,009	0,999	1,001	1,009
- 80	0,999	-	-	1,002	1,002	1,002	1,005	1,004	0,999
- 90	1,009	-	-	1,001	1,004	1,005	1,005	1,002	1,000
- 100	1,001	-	-	1,002	1,006	1,006	1,003	1,002	0,997

ANNEXE I - TEMPÉRATURE DANS LE SILLAGE DU TUBE ISOLÉ (FIL DE PLATINE) - V_0 = 25,6 m/s – Re = 20000

II - Courbes



ANNEXE II - VITESSE DANS LE SILLAGE DU TUBE ISOLÉ (FIL CHAUD)

V_o = 19,1 m/s - Re = 12100

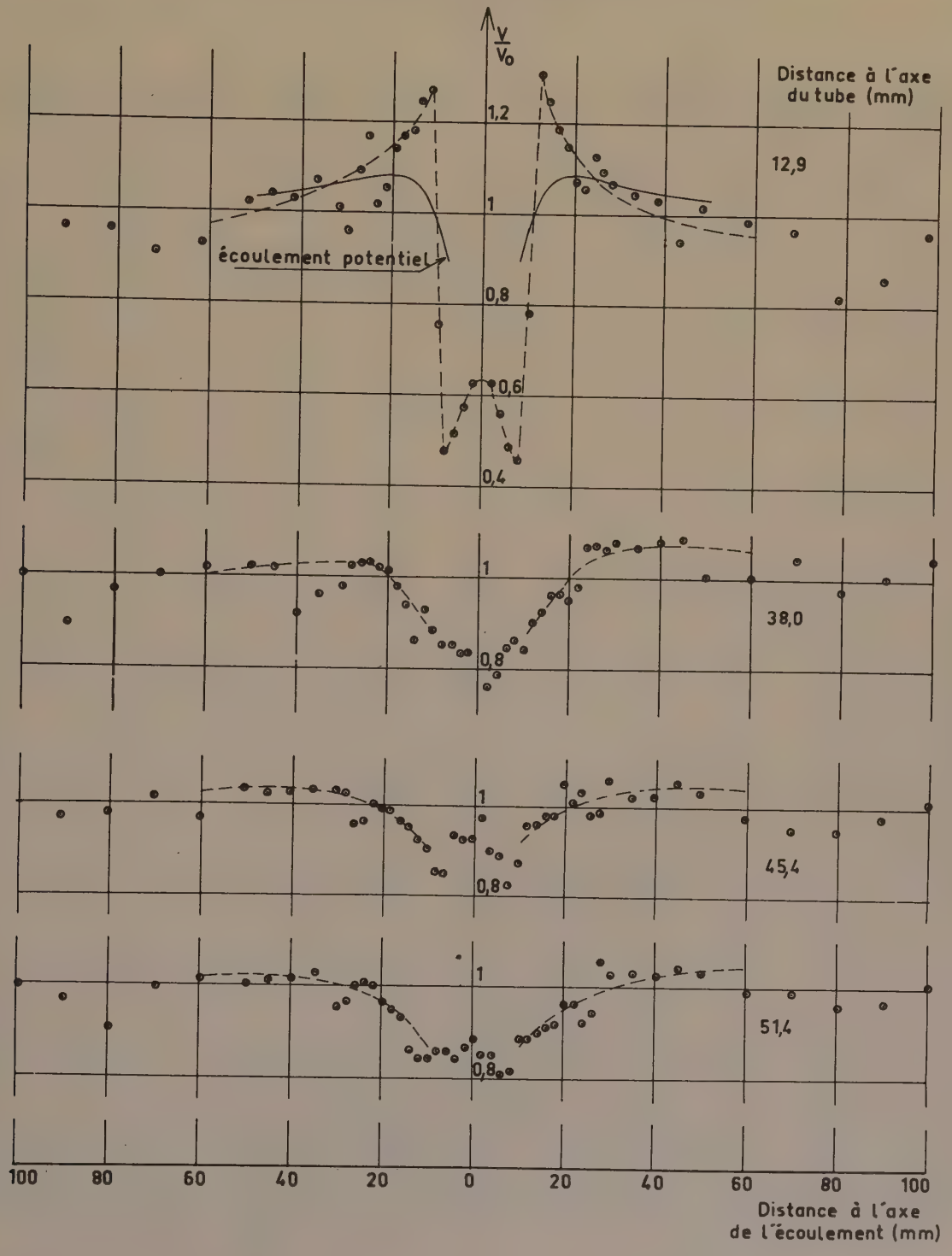
I - Résultats expérimentaux

Distance à l'axe de l'écoulement (mm)	D=12,9mm U_o=299,9 mV I=45mA		D=38,0 mm U_o=281,6 mV I=45mA		D=45,4 mm U_o=299,3mV I=45 mA		D=51,4 mm U_o=289,6 mV I=45 mA	
	U (mV)	V/V_o	U (mV)	V/V_o	U (mV)	V/V_o	U (mV)	V/V_o
100	332,7	1,00	315,4	1,00	329,1	1,00	317,8	1,00
90	333,3	0,96	315,1	0,90	329,6	0,97	318,5	0,97
80	333,4	0,96	315,7	0,97	329,4	0,98	317,6	0,90
70	332,2	0,91	315,0	1,01	328,5	1,01	317,6	1,00
60	331,3	0,93	314,4	1,02	327,2	0,97	316,9	1,01
50	331,8	1,02	314,3	1,03	327,7	1,03	316,7	1,01
45	331,6	1,04	314,1	1,02	327,6	1,02	316,7	1,01
40	331,2	1,03	313,9	0,92	327,5	1,03	316,6	1,01
35	330,9	1,07	312,9	0,96	327,4	1,03	316,6	1,03
30	329,5	1,01	312,9	0,98	327,4	1,03	315,9	0,95
28	329,3	1,00	313,7	1,03	327,3	1,02	315,8	0,97
26	329,8	1,09	313,6	1,03	326,6	0,96	316,7	1,00
24	329,5	1,11	313,6	1,03	326,8	0,96	316,8	1,00
22	329,2	1,02	313,8	1,02	327,9	1,00	317,0	1,00
20	328,2	1,06	313,9	1,02	327,8	0,99	317,3	0,96
18	328,8	1,14	314,4	0,98	328,2	0,99	317,6	0,95
16	328,3	1,17	313,5	0,94	328,6	0,96	318,0	0,93
14	327,7	1,19	314,3	0,86	328,9	0,95	317,6	0,86
12	326,4	1,25	315,6	0,93	329,3	0,92	317,8	0,84
10	325,9	1,27	316,1	0,89	329,5	0,91	318,1	0,84
8	336,1	0,75	317,1	0,85	328,9	0,85	319,7	0,86
6	344,6	0,48	317,6	0,85	329,0	0,85	319,7	0,85
4	347,7	0,51	317,8	0,83	329,3	0,93	319,8	0,84
2	345,2	0,57	317,2	0,84	329,2	0,93	319,4	0,86
0	343,1	0,63	317,4	0,86	328,9	0,93	319,1	0,89
2	341,6	0,61	316,6	0,76	328,9	0,97	319,3	0,85
4	343,1	0,63	316,6	0,79	329,3	0,90	319,5	0,85
6	342,7	0,56	317,4	0,85	329,3	0,89	318,7	0,81
8	345,4	0,49	317,1	0,86	328,4	0,83	318,5	0,82
10	347,5	0,46	317,0	0,84	327,8	0,88	319,2	0,88
12	336,7	0,78	315,7	0,90	328,4	0,96	319,0	0,88
14	325,2	1,31	315,2	0,92	327,7	0,96	318,3	0,90
16	325,9	1,25	314,1	0,96	327,2	0,98	317,7	0,91
18	327,1	1,19	313,8	0,96	326,6	0,98	317,5	0,92
20	327,6	1,15	312,2	0,95	326,4	1,05	316,7	0,96
22	327,3	1,07	311,8	0,98	326,2	1,02	316,4	0,96
24	327,5	1,06	311,5	1,07	325,9	1,03	315,2	0,92
26	328,5	1,13	312,0	1,07	325,1	0,98	314,9	0,95
28	328,8	1,09	311,9	1,06	324,9	0,99	314,6	1,05
30	329,1	1,07	311,8	1,08	325,3	1,06	315,2	1,03
35	329,7	1,04	311,7	1,07	325,8	1,02	315,2	1,03
40	330,0	1,03	311,7	1,08	325,9	1,02	315,0	1,02
45	329,4	0,94	311,6	1,09	325,7	1,05	314,9	1,04
50	330,3	1,02	310,6	1,01	325,6	1,03	314,9	1,03
60	330,5	1,00	310,7	1,00	324,8	0,98	313,9	0,99
70	331,2	0,97	312,2	1,05	325,8	0,95	315,5	0,99
80	332,6	0,82	313,2	0,97	327,4	0,95	316,5	0,96
90	331,6	0,86	312,8	1,00	326,9	0,98	316,0	0,97
100	331,2	0,96	311,9	1,05	325,9	1,02	315,1	1,01

ANNEXE II - VITESSE DANS LE SILLAGE DU TUBE ISOLÉ (FIL CHAUD)

V_o = 19,1 m/s - Re = 12100

II - Courbes



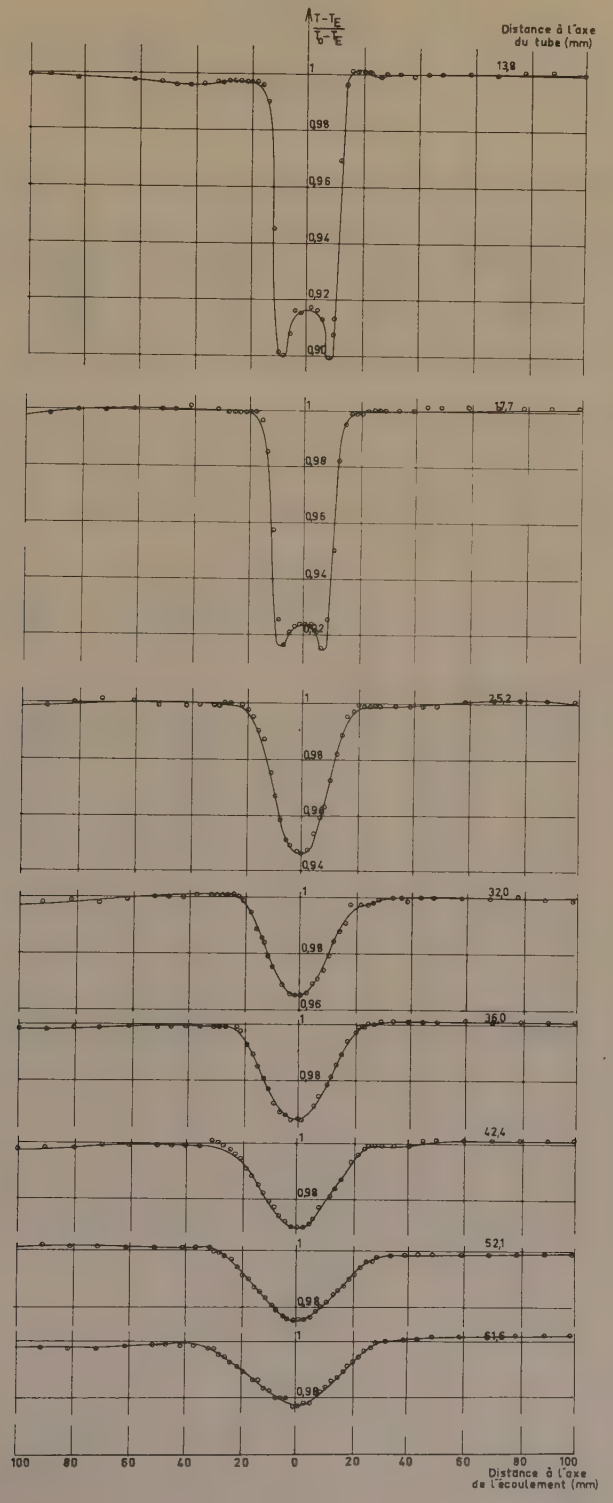
ANNEXE III - TEMPÉRATURE DANS LE SILLAGE DU TUBE ISOLÉ (THERMISTANCE) - V_o = 19,4 m/s - Re = 12 500

I - Résultats expérimentaux

Distance à l'axe de l'écoulement (mm)	1		2		3		4		5		6		7		8	
	D=13,8 mm T_E=15,5°C T_o=180,2°C		D=17,7 mm T_E=15,5°C T_o=180,8°C		D=25,2 mm T_E=15,5°C T_o=181,1°C		D=32,0 mm T_E=15,5°C T_o=181,2°C		D=36,0 mm T_E=16,0°C T_o=179,3°C		D=42,4 mm T_E=16,0°C T_o=179,9°C		D=52,1 mm T_E=16,0°C T_o=179,5°C		D=61,6 mm T_E=16,0°C T_o=179,3°C	
	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$	T	$\frac{T-T_E}{T_o-T_E}$
100	180,0	0,999	180,4	0,9975	181,0	0,999	180,7	0,997	179,0	0,998	179,5	0,9975	179,6	1,006	178,9	0,9975
90	180,0	0,999	180,5	0,998	181,0	0,999	180,8	0,9975	179,0	0,998	179,6	0,998	179,8	1,002	178,9	0,9975
80	179,9	0,998	180,6	0,999	181,1	1,000	181,0	0,999	179,2	0,999	179,6	0,998	179,7	1,004	178,9	0,9975
70	179,9	0,998	180,6	0,999	181,2	1,001	180,8	0,9975	179,2	0,999	179,7	0,999	179,7	1,001	178,9	0,9975
60	179,8	0,9975	180,8	1,000	181,1	1,000	181,0	0,999	179,2	0,999	179,8	0,999	179,6	1,001	179,0	0,998
50	179,7	0,997	180,8	1,000	181,0	0,999	181,2	1,000	179,2	0,999	179,8	0,999	179,6	1,001	179,1	0,999
45	179,6	0,996	180,8	1,000	181,1	1,000	181,2	1,000	179,2	0,999	179,8	0,999	179,6	1,001	179,1	0,999
40	179,6	0,996	180,9	1,001	181,0	0,999	181,2	1,000	179,2	0,999	179,8	0,999	179,6	1,001	179,1	0,999
35	179,6	0,996	180,8	1,000	180,9	0,999	181,4	1,001	179,2	0,999	179,8	0,999	179,6	1,001	179,1	0,999
30	179,7	0,997	180,8	1,000	180,9	0,999	181,3	1,001	179,2	0,999	180,0	1,001	179,6	1,001	178,9	0,9975
28	179,7	0,997	180,8	1,000	180,9	0,999	181,4	1,001	179,2	0,999	179,9	1,000	179,4	0,999	178,9	0,9975
26	179,8	0,9975	180,6	0,999	181,1	1,000	181,4	1,001	179,2	0,999	179,8	0,999	179,3	0,999	178,5	0,995
24	179,8	0,9975	180,6	0,999	181,1	1,000	181,3	1,001	179,2	0,999	179,5	0,9975	179,1	0,9975	178,4	0,9945
22	179,7	0,997	180,6	0,999	181,0	0,999	181,3	1,001	179,1	0,999	179,3	0,996	178,8	0,996	178,1	0,993
20	179,7	0,997	180,6	0,999	180,9	0,999	181,2	1,000	178,9	0,9975	179,0	0,9945	178,5	0,994	177,8	0,991
18	179,7	0,997	180,6	0,999	180,7	0,9975	180,9	0,998	178,1	0,993	178,5	0,991	178,1	0,991	177,5	0,989
16	179,7	0,997	180,6	0,999	180,3	0,995	180,3	0,9945	177,6	0,9895	178,0	0,988	177,8	0,990	177,4	0,988
14	179,6	0,996	180,2	0,996	179,6	0,991	179,3	0,9885	176,8	0,985	177,4	0,985	177,4	0,987	177,0	0,986
12	178,6	0,990	178,4	0,985	178,9	0,987	178,9	0,988	176,2	0,981	176,9	0,982	177,0	0,985	177,0	0,986
10	177,1	0,945	173,7	0,957	176,9	0,975	177,8	0,986	175,5	0,977	176,5	0,979	176,7	0,983	176,6	0,9835
8	164,2	0,903	168,5	0,9255	175,7	0,967	177,1	0,975	174,7	0,972	176,2	0,977	176,3	0,980	176,6	0,9835
6	163,7	0,900	167,0	0,9165	174,1	0,958	176,5	0,972	174,2	0,969	175,6	0,974	176,0	0,979	176,0	0,980
4	165,0	0,908	167,8	0,921	173,0	0,951	175,5	0,966	174,0	0,9675	175,3	0,972	175,6	0,976	176,0	0,980
2	166,4	0,916	168,1	0,923	172,6	0,949	175,6	0,966	173,8	0,966	175,0	0,970	175,5	0,9755	176,0	0,980
0	166,2	0,915	168,3	0,924	172,3	0,947	175,4	0,965	173,9	0,967	175,0	0,970	175,4	0,975	175,5	0,977
2	166,4	0,916	168,3	0,924	172,1	0,946	175,5	0,966	173,8	0,966	175,0	0,970	175,5	0,9755	175,5	0,977
4	166,5	0,917	168,3	0,924	172,4	0,947	175,5	0,966	174,2	0,963	175,2	0,971	175,5	0,9755	175,7	0,978
6	166,3	0,916	167,7	0,921	173,3	0,953	176,1	0,969	174,5	0,971	175,5	0,973	175,6	0,976	175,9	0,979
8	165,9	0,913	166,7	0,915	174,2	0,958	176,4	0,971	175,0	0,974	176,1	0,977	175,9	0,978	176,2	0,981
10	163,6	0,899	168,5	0,9255	174,9	0,9625	176,9	0,974	175,5	0,977	176,4	0,979	176,2	0,980	176,3	0,982
12	165,9	0,913	172,6	0,950	176,5	0,972	177,8	0,979	176,2	0,981	176,8	0,981	176,5	0,982	176,6	0,9835
14	175,1	0,969	177,8	0,982	178,1	0,982	178,6	0,984	176,8	0,985	177,2	0,9835	176,9	0,984	177,0	0,986
16	179,6	0,996	180,0	0,995	179,2	0,9885	179,2	0,988	177,6	0,9895	177,8	0,987	177,2	0,986	177,2	0,987
18	180,3	1,001	180,6	0,999	180,3	0,995	179,8	0,996	178,3	0,994	178,2	0,990	177,4	0,987	177,6	0,990
20	180,3	1,001	180,7	0,999	180,6	0,997	180,5	0,9975	178,6	0,996	178,8	0,993	177,8	0,990	177,8	0,991
22	180,3	1,001	180,7	0,999	180,9	0,999	180,6	0,996	179,1	0,999	179,2	0,996	178,1	0,991	178,1	0,993
24	180,3	1,001	180,8	1,000	181,0	0,999	180,8	0,9975	179,3	1,000	179,5	0,9975	178,5	0,994	178,5	0,995
26	180,2	1,000	180,8	1,000	181,0	0,999	180,8	0,9975	179,3	1,000	179,7	0,999	178,8	0,996	178,7	0,996
28	180,1	0,999	180,8	1,000	181,0	0,999	180,9	0,998	179,3	1,000	179,8	0,999	178,9	0,996	178,9	0,9975
30	180,2	1,000	180,8	1,000	181,0	0,999	181,0	0,999	179,5	1,001	179,8	0,999	179,1	0,9975	179,2	0,999
35	180,3	1,000	180,8	1,000	180,9	0,999	181,2	1,000	179,4	1,001	179,8	0,999	179,2	0,998	179,3	1,000
40	180,1	0,999	180,8	1,000	181,0	0,999	181,1	0,999	179,5	1,001	179,8	0,999	179,2	0,9832	179,3	1,000
45	180,2	1,000	180,9	1,001	181,0	0,999	181,2	1,000	179,5	1,001	180,0	1,001	179,2	0,998	179,4	1,001
50	180,2	1,000	180,9	1,001	181,0	0,999	181,2	1,000	179,5	1,001	180,0	1,001	179,2	0,998	179,6	1,002
60	180,2	1,000	180,9	1,001	181,2	1,001	181,2	1,000	179,5	1,001	180,0	1,001	179,2	0,998	179,6	1,002
70	180,2	1,000	180,9	1,001	181,2	1,001	181,2	1,000	179,5	1,001	180,0	1,001	179,2	0,998	179,6	1,002
80	180,4	1,001	181,0	1,001	181,2	1,001	181,3	1,001	179,5	1,001	180,0	1,001	179,2	0,998	179,7	1,002
90	180,3	1,001	181,0	1,001	181,2	1,001	181,2	1,000	179,5	1,001	180,0	1,001	179,2	0,998	179,7	1,002
100	180,4	1,001	180,9	1,001	181,1	1,000	181,1	0,999	179,5	1,001	180,0	1,001	179,2	0,998	179,6	1,002

ANNEXE III - TEMPÉRATURE DANS LE SILLAGE DU TUBE ISOLÉ (THERMISTANCE) - V_o = 19,4 m/s - Re = 12 500

II - Courbes

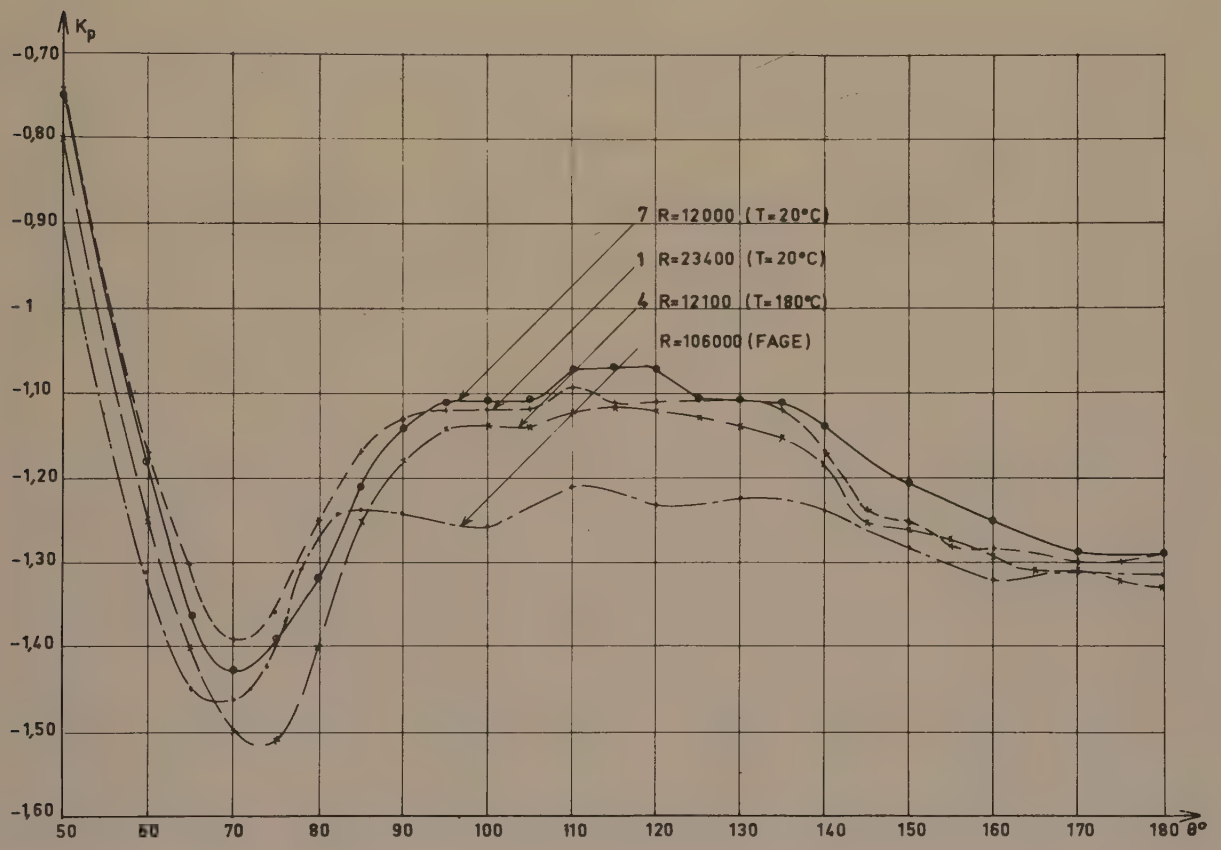


ANNEXE IV
PRESSION À LA PAROI DU TUBE ISOLÉ.
I - Résultats expérimentaux

	1	2	3	4	5	6	7
Vitesse air	16,8 m/s	17,7 m/s	19,2 m/s	19,1 m/s	20,1 m/s	21,8 m/s	8,7 m/s
Temp. air	20°C	20°C	20°C	181°C	182°C	181°C	20°C
Reynolds	23400	24600	26600	12100	12800	13900	12000
Temp. eau ref.	/	/	/	17°C	17,5°C	175°C	/

Dist. ang. au point d'arrêt	Δp (mV)	Kp	Δp (mV)	Kp	Δp (mV)	Kp	Δp (mV)	Kp	Δp (mV)	Kp	Δp (mV)	Kp	Δp (mV)	Kp
0	109	1,00	119	1,00	139	1,00	85	1,00	96	1,00	111	1,00	28	1,00
10	101	0,925	110	0,92	128	0,92	79	0,93	90	0,94	102	0,92	25	0,89
20	73	0,66	79	0,66	94	0,68	57	0,67	63	0,66	73	0,66	18	0,64
30	29	0,26	32	0,27	37	0,27	22	0,25	24	0,25	28	0,25	7	0,25
35	3	0,03	3	0,025	4	0,03	1	0,01	0	0	0	0	0	0
36	- 4	- 0,03	- 3	- 0,025	- 5	-0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
40	- 24	-0,22	- 28	- 0,235	- 34	-0,245	- 24	-0,28	- 26	- 0,27	- 30	- 0,27	-7	-0,25
50	- 81	- 0,74	- 90	- 0,76	-105	-0,755	- 69	-0,80	- 77	- 0,80	-88	- 0,79	-21	-0,75
60	- 128	-1,17	-140	- 1,18	-164	-1,18	-107	-1,25	-120	-1,25	-139	-1,25	-33	-1,18
65	- 144	-1,31	-158	- 1,33	-185	-1,33	-120	-1,40	-135	-1,41	-156	-1,405	-38	-1,36
70	- 152	-1,39	-166	- 1,39	-196	-1,41	-127	-1,50	-144	-1,50	-167	-1,50	-40	-1,43
75	- 149	-1,36	-165	- 1,39	-192	-1,38	-128	-1,51	-145	-1,51	-165	-1,49	-40	-1,43
80	- 137	-1,25	-152	-1,28	-178	-1,28	-120	-1,40	-134	-1,40	-156	-1,405	-37	-1,32
85	- 128	-1,17	-140	-1,18	-166	-1,19	-107	-1,25	-120	-1,25	-140	-1,26	-34	-1,21
90	- 124	-1,13	-137	- 1,15	-160	-1,15	-101	-1,18	-115	-1,20	-131	-1,18	-32	-1,14
95	- 123	-1,12	-134	-1,13	-158	-1,14	- 97	-1,14	-111	-1,16	-129	-1,16	-31	-1,11
100	- 123	-1,12	-134	-1,13	-157	-1,13	- 97	-1,14	-111	-1,16	-129	-1,16	-31	-1,11
105	- 122	-1,12	- 133	-1,12	-157	-1,13	- 97	-1,14	-110	-1,15	-129	-1,16	-31	-1,11
110	- 120	-1,09	-132	-1,11	-156	-1,12	- 97	-1,14	-110	-1,15	-127	-1,14	-30	-1,07
115	- 121	-1,11	-131	- 1,10	-154	-1,11	- 97	-1,14	-110	-1,15	-127	-1,14	-30	-1,07
120	- 121	-1,11	-131	-1,10	-154	-1,11	- 97	-1,14	-110	-1,15	-127	-1,14	-30	-1,07
125	- 121	-1,11	-130	-1,09	-154	-1,11	- 98	-1,15	-111	-1,16	-129	-1,16	-31	-1,11
130	-122	-1,11	-131	-1,10	-155	-1,115	- 99	-1,16	-112	-1,17	-129	-1,16	-31	-1,11
140	-130	-1,17	-141	-1,18	-167	-1,20	-103	-1,21	-117	-1,22	-136	-1,225	-32	-1,14
150	- 138	-1,25	-150	-1,26	-178	-1,28	-110	-1,295	-124	-1,29	-145	-1,31	-34	-1,21
160	-142	-1,28	-154	-1,29	-181	-1,30	-112	-1,32	-126	-1,31	-147	-1,32	-35	-1,25
170	-144	-1,30	-156	-1,31	-185	-1,33	-114	-1,34	-129	-1,34	-149	-1,34	-36	-1,29
180	-143	-1,29	-158	-1,33	-188	-1,35	-115	-1,35	-129	-1,34	-150	-1,35	-36	-1,29

ANNEXE IV
PRESSION À LA PAROI DU TUBE ISOLÉ.
II - Courbes



Annexe V

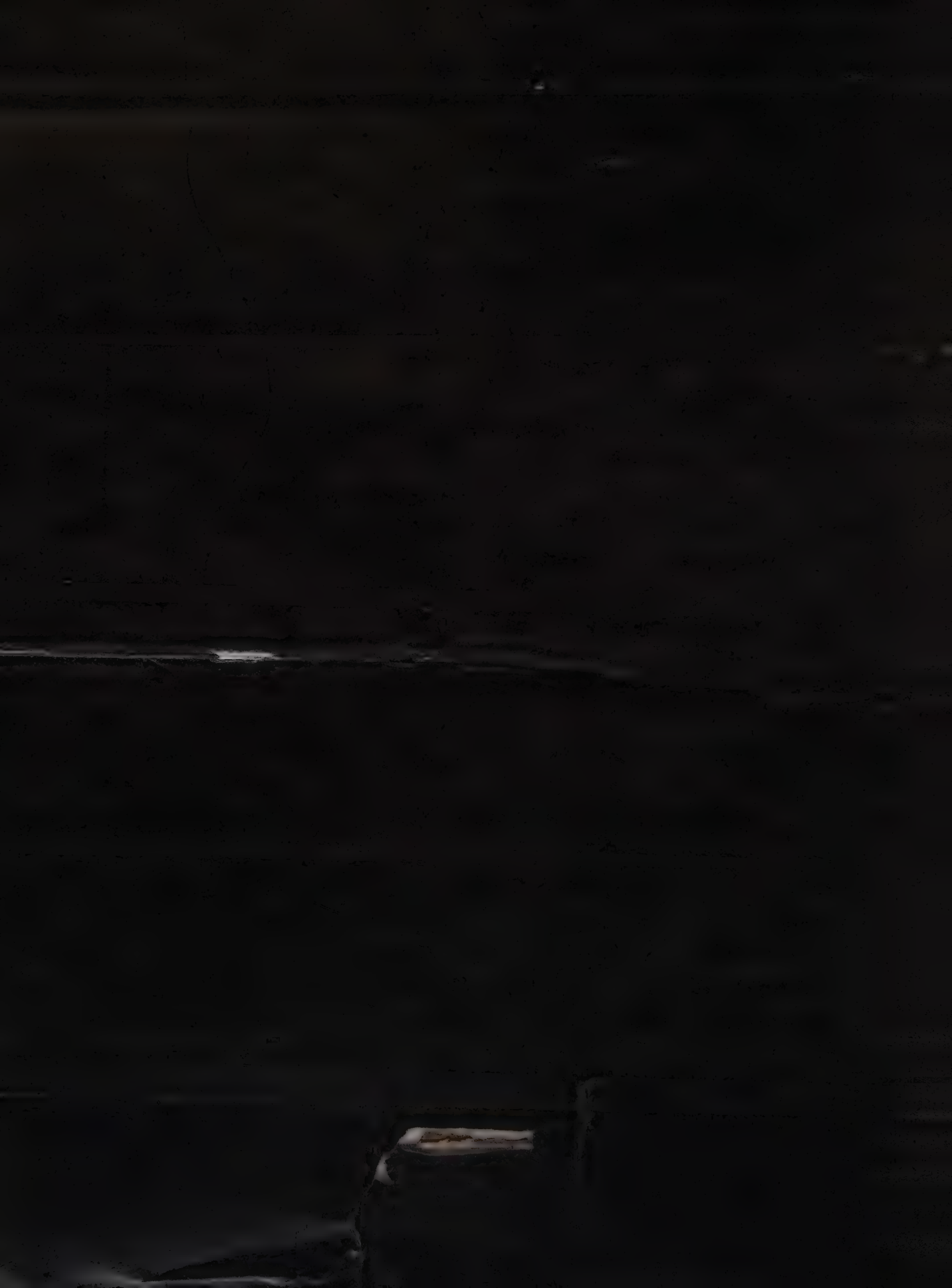
Pression à la paroi des tubes du faisceau (Résultats des mesures)

	TUBE N
	p_o = - 24
	$p_o - p_{réf}$ =
	V_o =
	T_o =
	1 mV = 0
θ	Δp(mV)
0	57
5	55
10	52
15	47
20	42
25	36
30	30
35	22
40	15
45	7
50	0
55	- 8
60	-17
65	-22
70	-25
75	-26
80	-26
85	-23
90	-20
95	-20
100	-18
105	-19
110	-18
115	-20
120	-19
125	-19
130	-19
140	-19
150	-20
160	-20
170	-19
180	-20
-170	-19
-160	-20
-150	-21
-140	-20
-130	-20
-125	-19
-120	-19
-115	-18
-110	-18
-105	-19
-100	-19
- 95	-20
- 90	-21
- 85	-27
- 80	-28
- 75	-27
- 70	-22
- 65	-13
- 60	- 6
- 55	+ 5
- 50	13
- 45	22
- 40	30
- 35	28
- 30	44
- 25	49
- 20	52
- 15	54
- 10	56
- 5	56
0	56

	RANGEE N°6						RANGEE N°7					
	TUBE N°52 (OII)		TUBE N°56 (MII)		TUBE N°58 (LII)		TUBE N°61 (PI)		TUBE N°65 (RI)		TUBE N°67 (SI)	
	p_o = - 556 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 110,61 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 584 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 110,61 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 625 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 122,57 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 480 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 104,63 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 464 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 107,62 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 174°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 467 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 109,12 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 173,5°C 1 mV = 0,29 mm CE	
θ	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp
0	103	2,59	108	2,75	115	2,93	82	1,94	77	2,07	82	2,09
5	102	2,57	110	2,80	116	2,98	80	1,89	80	2,15	85	2,17
10	104	2,62	114	2,91	122	3,11	80	1,89	85	2,28	92	2,34
15	106	2,67	126	3,21	130	3,31	85	2,01	90	2,42	100	2,55
20	108	2,72	120	3,06	146	3,72	85	2,01	95	2,55	105	2,68
25	112	2,82	122	3,11	136	3,47	85	2,01	105	2,82	108	2,75
30	110	2,77	120	3,06	136	3,47	87	2,06	105	2,82	110	2,80
35	108	2,72	116	2,96	134	3,42	81	1,92	102	2,74	105	2,68
40	100	2,52	106	2,70	122	3,11	75	1,78	90	2,42	95	2,42
45	82	2,06	88	2,24	106	2,70	63	1,49	77	2,07	75	1,91
50	64	1,61	66	1,68	85	2,17	48	1,14	60	1,61	60	1,53
55	46	1,16	44	1,12	58	1,48	30	0,71	42	1,13	43	1,10
60	23	0,56	18	0,46	32	0,82	10	0,24	18	0,48	20	0,51
65	- 3	-0,08	- 12	-0,31	4	0,10	- 12	-0,28	0	0	0	0
70	- 24	-0,60	- 38	-0,97	- 25	-0,64	- 31	-0,73	- 20	-0,54	- 20	-0,51
75	- 45	-1,13	- 60	-1,59	- 48	-1,22	- 50	-1,18	- 40	-1,07	- 40	-1,02
80	- 62	-1,56	- 79	-2,01	- 68	-1,73	- 62	-1,47	- 53	-1,42	- 55	-1,40
85	- 73	-1,84	- 90	-2,29	- 80	-2,04	- 70	-1,66	- 60	-1,61	- 65	-1,56
90	- 78	-1,99	-104	-2,65	- 88	-2,24	- 72	-1,70	- 65	-1,75	- 67	-1,71
95	- 72	-1,81	- 88	-2,24	- 83	-2,11	- 65	-1,54	- 62	-1,67	- 62	-1,58
100	- 63	-1,59	- 78	-2,00	- 71	-1,81	- 58	-1,37	- 55	-1,48	- 55	-1,40
105	- 53	-1,33	- 65	-1,66	- 67	-1,71	- 50	-1,18	- 45	-1,21	- 46	-1,17
110	- 40	-1,00	- 52	-1,32	- 46	-1,17	- 41	-0,97	- 38	-1,02	- 35	-0,89
115	- 30	-0,75	- 38	-0,97	- 32	-0,82	- 34	-0,80	- 25	-0,67	- 30	-0,76
120	- 19	-0,48	- 23	-0,59	- 18	-0,46	- 22	-0,52	- 15	-0,40	- 18	-0,46
125	- 9	-0,23	- 15	-0,38	- 8	-0,20	- 15	-0,36	- 8	-0,21	- 10	-0,25
130	- 4	-0,10	- 6	-0,15	0	0	- 9	-0,21	- 3	-0,08	- 5	-0,13
140	4	0,10	0	0	8	0,20	- 2	-0,05	0	0	0	0
150	6	0,15	3	0,08	10	0,25	- 2	-0,05	0	0	0	0
160	8	0,20	5	0,11	11	0,28	- 2	-0,05	0	0	1	0,03
170	10	0,25	7	0,18	14	0,36	0	0	0	0	4	0,10
180	12	0,30	9	0,23	16	0,41	2	0,05	4	0,11	4	0,10
-170	11	0,28	7	0,18	16	0,41	2	0,05	5	0,13	4	0,10
-160	8	0,20	5	0,13	14	0,36	0	0	0	0	2	0,05
-150	8	0,20	4	0,10	11	0,28	0	0	0	0	0	0
-140	5	0,13	2	0,05	11	0,28	- 2	-0,05	0	0	0	0
-130	0	0	- 5	-0,13	4	0,10	- 8	-0,19	- 5	-0,13	- 6	-0,15
-125	- 8	-0,20	- 8	-0,20	- 5	-0,13	- 15	-0,36	- 10	-0,27	- 11	-0,28
-120	- 19	-0,48	- 25	-0,64	- 18	-0,46	- 20	-0,47	- 20	-0,54	- 18	-0,46
-115	- 30	-0,75	- 37	-0,94	- 30	-0,76	- 28	-0,66	- 28	-0,75	- 27	-0,69
-110	- 42	-1,06	- 51	-1,30	- 46	-1,17	- 37	-0,88	- 36	-0,97	- 38	-0,97
-105	- 55	-1,38	- 78	-1,99	- 61	-1,55	- 50	-1,18	- 48	-1,29	- 48	-1,22
-100	- 69	-1,74	- 88	-2,24	- 80	-2,04	- 63	-1,49	- 58	-1,56	- 60	-1,53
- 95	- 81	-2,04	- 98	-2,50	- 92	-2,35	- 75	-1,78	- 70	-1,88	- 65	-1,66
- 90	- 84	-2,11	-102	-2,60	- 95	-2,42	- 78	-1,85	- 68	-1,83	- 70	-1,78
- 85	- 80	-2,01	- 96	-2,45	- 90	-2,29	- 72	-1,70	- 64	-1,72	- 65	-1,66
- 80	- 68	-1,71	- 82	-2,09	- 75	-1,91	- 65	-1,54	- 55	-1,48	- 55	-1,40
- 75	- 48	-1,21	- 60	-1,53	- 54	-1,38	- 48	-1,14	- 42	-1,13	- 42	-1,07
- 70	- 26	-0,65	- 35	-0,89	- 30	-0,76	- 23	-0,54	- 25	-0,67	- 25	-0,64
- 65	- 2	-0,05	- 6	-0,15	+ 25	0,64	0	0	- 2	-0,05	- 5	-0,13
- 60	25	0,63	+ 20	+0,51	58	1,48	26	0,62	15	0,40	15	0,38
- 55	50	1,25	50	1,27	81	2,06	50	1,18	40	1,07	35	0,89
- 50	75	1,89	75	1,91	102	2,60	72	1,70	55	1,48	52	1,33
- 45	92	2,31	102	2,60	120	3,06	87	2,06	70	1,88	67	1,71
- 40	110	2,77	116	2,96	130	3,31	105	2,49	80	2,15	78	1,99
- 35	120	3,02	125	3,19	135	3,44	115	2,72	90	2,42	82	2,09
- 30	125	3,15	130	3,31	132	3,36	115	2,72	95	2,55	88	2,24
- 25	125	3,15	130	3,31	130	3,31	116	2,73	95	2,55	88	2,24
- 20	122	3,07	128	3,26	128	3,26	112	2,65	90	2,42	85	2,17
- 15	118	2,97	120	3,06	124	3,16	106	2,51	90	2,42	85	2,17
- 10	110	2,77	116	2,60	118	3,00	100	2,37	85	2,28	82	2,09
- 5	108	2,72	114	2,91	114	2,91	95	2,25	82	2,20	82	2,09
0	105	2,64	112	2,85	114	2,91	90	2,13	80	2,15	83	2,12

	RANGEE N°1						RANGEE N°2						RANGE			
	TUBE N°1 (AI)		TUBE N°5 (CI)		TUBE N°7 (DI)		TUBE N°12 (XII)		TUBE N°16 (WII)		TUBE N°18 (VII)		TUBE N°21 (FI)		TUBE N°2	
	p_o = - 241 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 16,23 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 11,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 241 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 16,23 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 11,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 228 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 15,94 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 16°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 229 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 19,55 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 7°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 214 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 18,95 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 12°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 220 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 18,65 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 4°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 241 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 23,32 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 11°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 242 m $p_o - p_{réf}$ = 24, V_o = 8,3 T_o = 11, 1 mV = 0,29	
θ	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	
0	57	3,91	59	4,19	60	4,26	-31	-1,07	-22	-0,76	-33	-1,14	13	0,86	18	
5	55	3,77	60	4,26	58	4,12	-27	-0,93	-26	-0,90	-33	-1,14	13	0,86	18	
10	52	3,57	58	4,12	58	4,12	-23	-0,79	-27	-0,93	-30	-1,03	15	0,99	19	
15	47	3,22	56	3,98	55	3,91	-23	-0,79	-26	-0,90	-21	-0,72	16	1,06	19	
20	42	2,88	52	3,69	53	3,76	-22	-0,76	-20	-0,69	- 6	-0,21	16	1,06	24	
25	36	2,47	46	3,27	48	3,41	-17	-0,59	-10	-0,34	13	0,45	19	1,25	26	
30	30	2,06	41	2,91	42	2,98	-15	-0,52	5	0,17	35	1,21	22	1,46	24	
35	22	1,51	33	2,34	37	2,63	- 9	-0,31	18	0,62	53	1,83	22	1,46	24	
40	15	1,03	24	1,70	28	1,99	- 2	-0,07	35	1,21	70	2,41	23	1,52	30	
45	7	0,48	17	1,21	19	1,35	0	0	45	1,55	75	2,59	21	1,39	29	
50	0	0	8	0,57	11	0,78	10	0,34	48	1,66	74	2,55	17	1,13	24	
55	- 8	-0,55	- 3	-0,21	2	0,14	5	0,17	48	1,66	65	2,24	13	0,86	20	
60	-17	-1,17	- 7	-0,50	- 8	-0,57	4	0,14	39	1,34	50	1,72	7	0,46	18	
65	-22	-1,51	-18	-1,28	-16	-1,14	0	0	26	0,90	30	1,03	3	0,20	6	
70	-25	-1,71	-24	-1,70	-24	-1,70	-10	-0,34	10	0,34	8	0,28	- 5	-0,33	- 6	
75	-26	-1,78	-28	-1,99	-28	-1,99	-19	-0,66	- 9	-0,31	-14	-0,48	-10	-0,66	-12	
80	-26	-1,78	-28	-1,99	-30	-2,13	-28	-0,97	-24	-0,83	-31	-1,07	-14	-0,93	-18	
85	-23	-1,58	-26	-1,85	-30	-2,13	-35	-1,21	-34	-1,17	-40	-1,38	-17	-1,13	-23	
90	-20	-1,37	-22	-1,56	-25	-1,78	-40	-1,38	-39	-1,34	-41	-1,41	-18	-1,19	-24	
95	-20	-1,37	-20	-1,42	-21	-1,49	-40	-1,38	-37	-1,28	-37	-1,28	-18	-1,19	-23	
100	-18	-1,23	-20	-1,42	-20	-1,42	-38	-1,31	-32	-1,10	-30	-1,03	-14	-0,93	-21	
105	-19	-1,30	-20	-1,42	-20	-1,42	-34	-1,17	-25	-0,86	-24	-0,83	-13	-0,86	-18	
110	-18	-1,23	-20	-1,42	-21	-1,49	-30	-1,03	-22	-0,76	-21	-0,72	-12	-0,80	-16	
115	-20	-1,37	-20	-1,42	-20	-1,42	-25	-0,86	-18	-0,62	-17	-0,59	- 9	-0,60	-14	
120	-19	-1,30	-20	-1,42	-20	-1,42	-23	-0,79	-13	-0,45	-14	-0,48	- 8	-0,53	-12	
125	-19	-1,30	-21	-1,49	-21	-1,49	-21	-0,72	-10	-0,34	-10	-0,34	- 7	-0,46	- 9	
130	-19	-1,30	-20	-1,42	-21	-1,49	-19	-0,66	- 8	-0,28	- 8	-0,28	- 5	-0,33	- 9	
140	-19	-1,30	-21	-1,49	-21	-1,49	-17	-0,59	- 8	-0,28	- 9	-0,31	- 5	-0,33	-10	
150	-20	-1,37	-20	-1,42	-22	-1,56	-18	-0,62	-10	-0,34	- 8	-0,28	- 6	-0,40	-10	
160	-20	-1,37	-22	-1,56	-22	-1,56	-18	-0,62	-10	-0,34	- 9	-0,31	- 5	-0,33	- 8	
170	-19	-1,30	-22	-1,56	-21	-1,49	-15	-0,52	- 8	-0,28	- 6	-0,21	- 4	-0,27	- 8	
180	-20	-1,37	-24	-1,70	-22	-1,56	-12	-0,41	- 8	-0,28	- 5	-0,17	- 4	-0,27	- 7	
-170	-19	-1,30	-24	-1,70	-22	-1,56	-13	-0,45	- 8	-0,28	- 7	-0,24	- 4	-0,27	- 7	
-160	-20	-1,37	-24	-1,70	-21	-1,49	-15	-0,52	-12	-0,41	- 9	-0,31	- 4	-0,27	- 8	
-150	-21	-1,44	-24	-1,70	-22	-1,56	-16	-0,55	-10	-0,34	-10	-0,34	- 5	-0,33	- 9	
-140	-20	-1,37	-24	-1,70	-20	-1,42	-16	-0,55	-11	-0,38	-10	-0,34	- 5	-0,33	- 8	
-130	-20	-1,37	-24	-1,70	-21	-1,49	-16	-0,55	-12	-0,41	-11	-0,38	- 5	-0,33	- 9	
-125	-19	-1,30	-23	-1,63	-20	-1,42	-16	-0,55	-13	-0,45	-13	-0,45	- 7	-0,46	-11	
-120	-19	-1,30	-23	-1,63	-20	-1,42	-18	-0,62	-15	-0,52	-14	-0,48	- 9	-0,60	-12	
-115	-18	-1,23	-23	-1,63	-20	-1,42	-20	-0,69	-17	-0,58	-19	-0,66	-10	-0,66	-14	
-110	-18	-1,23	-23	-1,63	-20	-1,42	-23	-0,79	-21	-0,72	-20	-0,69	-10	-0,66	-15	
-105	-19	-1,30	-24	-1,70	-20	-1,42	-25	-0,86	-26	-0,90	-24	-0,83	-13	-0,86	-17	
-100	-19	-1,30	-23	-1,63	-20	-1,42	-29	-1,00	-31	-1,07	-30	-1,03	-15	-0,99	-20	
- 95	-20	-1,37	-24	-1,70	-22	-1,56	-39	-1,39	-34	-1,17	-32	-1,10	-20	-1,33	-23	
- 90	-21	-1,44	-25	-1,78	-24	-1,70	-48	-1,66	-34	-1,17	-31	-1,07	-20	-1,33	-25	
- 85	-27	-1,85	-26	-1,85	-28	-1,99	-46	-1,59	-28	-0,97	-28	-0,97	-19	-1,25	-23	
- 80	-28	-1,92	-35	-2,49	-33	-2,34	-35	-1,21	-20	-0,69	-22	-0,76	-15	-0,99	-20	
- 75	-27	-1,85	-33	-2,34	-33	-2,34	-17	-0,59	-10	-0,34	-14	-0,48	- 8	-0,53	-14	
- 70	-22	-1,51	-30	-2,13	-30	-2,13	5	0,17	0	0	- 9	-0,31	- 1	-0,10	- 7	
- 65	-13	-0,09	-22	-1,56	-24	-1,70	30	1,03	10	0,34	- 2	-0,07	5	0,33	0	
- 60	- 6	-0,04	-15	-1,07	-17	-1,21	50	1,72	15	0,52	0	0	13	0,86	10	
- 55	+ 5	0,03	- 6	-0,43	- 8	-0,57	65	2,24	15	0,52	+ 5	0,17	21	1,39	16	
- 50	13	0,89	5	0,36	0	0	74	2,55	14	0,48	3	0,10	25	1,66	22	
- 45	22	1,51	12	0,85	12	0,85	73	2,52	6	0,21	- 5	-0,17	28	1,86	25	
- 40	30	2,06	23	1,63	20	1,56	66	2,28	0	0	- 7	-0,24	28	1,86	27	
- 35	28	1,92	30	2,13	28	1,99	45	1,55	-10	-0,34	- 7	-0,24	28	1,86	28	
- 30	44	3,02	37	2,63	37	2,63	22	0,76	-15	-0,52	- 8	-0,28	26	1,72	27	
- 25	49	3,36	45	3,20	43	3,05	2	0,07	-17	-0,59	-12	-0,41	23	1,52	26	
- 20	52	3,57	50	3,55	48	3,41	-16	-0,55	-16	-0,55	-15	-0,52	20	1,33	22	
- 15	54	3,70	55	3,91	53	3,76	-17	-0,59	-17	-0,59	-20	-0,69	17	1,13	20	
- 10	56	3,84	57	4,05	57	4,05	-33	-1,14	-19	-0,66	-24	-0,83	15	0,99	18	
- 5	56	3,84	59	4,19	58	4,12	-33	-1,14	-20	-0,69	-30	-1,03	14	0,93	17	
0	56	3,84	59	4,19	60	4,26	-30	-1,03	-23	-0,79	-33	-1,14	13	0,86	17	

E N°3			RANGEE N°4						RANGEE N°5					
(MI)	TUBE N°27 (II)		TUBE N°32 (TII)		TUBE N°36 (RII)		TUBE N°38 (QII)		TUBE N°41 (KI)		TUBE N°45 (HI)		TUBE N°47 (NI)	
CE 2 mm CE m/s °C mm CE	p_o = - 221 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 22,12 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 13,5°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 249 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 31,13 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 4°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = 219 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 26,32 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 4°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 218 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 27,22 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 4°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 238 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 32,88 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 12°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 236 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 33,48 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 12,5°C 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 233 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 32,88 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 11,5°C 1 mV = 0,15 mm CE	
Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp
1,23	24	0,83	51	1,76	38	1,31	40	1,38	58	2,07	57	1,97	56	2,00
1,23	27	0,93	52	1,79	37	1,28	42	1,45	58	2,07	58	2,00	58	2,07
1,30	32	1,10	51	1,76	38	1,31	43	1,48	59	2,11	63	2,17	61	2,18
1,30	36	1,24	53	1,83	40	1,38	45	1,55	63	2,25	67	2,31	64	2,28
1,65	42	1,45	56	1,93	45	1,55	49	1,69	65	2,32	70	2,41	70	2,50
1,78	50	1,72	57	1,97	47	1,62	52	1,79	68	2,43	74	2,55	70	2,50
1,65	56	1,93	59	2,03	52	1,79	54	1,86	70	2,50	76	2,62	71	2,53
1,65	57	1,97	58	2,00	52	1,79	56	1,93	68	2,43	76	2,62	70	2,50
2,06	55	1,90	56	1,93	49	1,69	50	1,72	62	2,21	69	2,38	65	2,32
1,99	51	1,76	46	1,59	45	1,55	46	1,59	58	2,07	60	2,07	60	2,14
1,65	42	1,45	38	1,31	37	1,28	37	1,28	48	1,71	50	1,72	48	1,71
1,37	31	1,07	26	0,90	28	0,97	27	0,93	32	1,14	37	1,28	34	1,21
1,23	16	0,55	9	0,31	15	0,52	14	0,48	18	0,64	20	0,69	17	0,61
0,41	- 1	-0,03	- 6	-0,21	2	0,07	0	0	2	0,07	1	0,03	0	0
-0,41	-16	-0,55	-23	-0,79	-15	-0,52	-19	-0,66	-13	-0,46	-15	-0,52	-21	-0,75
-0,82	-30	-1,03	-38	-1,31	-29	-1,00	-29	-1,00	-27	-0,96	-30	-1,03	-35	-1,25
-1,23	-41	-1,41	-47	-1,62	-38	-1,31	-40	-1,38	-38	-1,36	-43	-1,48	-46	-1,64
-1,58	-48	-1,66	-56	-1,93	-46	-1,59	-44	-1,52	-43	-1,54	-49	-1,69	-53	-1,89
-1,65	-48	-1,66	-58	-2,00	-49	-1,69	-48	-1,66	-43	-1,54	-52	-1,79	-54	-1,93
-1,58	-45	-1,55	-58	-2,00	-46	-1,59	-44	-1,52	-42	-1,50	-50	-1,72	-52	-1,86
-1,44	-42	-1,45	-52	-1,79	-42	-1,45	-39	-1,34	-35	-1,25	-43	-1,48	-48	-1,71
-1,23	-37	-1,28	-46	-1,59	-36	-1,24	-33	-1,14	-28	-1,00	-36	-1,24	-40	-1,43
-1,10	-32	-1,10	-41	-1,41	-30	-1,03	-29	-1,00	-25	-0,89	-28	-0,97	-33	-1,18
-0,96	-29	-1,00	-33	-1,14	-25	-0,86	-24	-0,83	-19	-0,68	-22	-0,76	-25	-0,89
-0,82	-26	-0,90	-26	-0,90	-22	-0,76	-20	-0,69	-13	-0,46	-15	-0,52	-22	-0,79
-0,62	-23	-0,79	-20	-0,69	-18	-0,62	-18	-0,62	- 8	-0,29	-10	-0,34	-15	-0,54
-0,62	-23	-0,79	-17	-0,59	-14	-0,48	-15	-0,52	- 5	-0,18	- 6	-0,21	-12	-0,43
-0,69	-24	-0,83	-12	-0,41	-13	-0,45	-14	-0,48	0	0	- 3	-0,10	- 7	-0,25
-0,69	-24	-0,83	-11	-0,38	-13	-0,45	-12	-0,41	- 1	-0,04	- 2	-0,07	- 7	-0,25
-0,55	-24	-0,83	-10	-0,34	-13	-0,45	-11	-0,38	- 1	-0,04	0	0	- 6	-0,21
-0,55	-21	-0,72	- 9	-0,31	-10	-0,34	- 9	-0,31	0	0	0	0	- 6	-0,21
-0,48	-18	-0,62	- 8	-0,28	-10	-0,34	- 7	-0,24	2	0,07	0	0	- 3	-0,11
-0,48	-18	-0,62	- 8	-0,28	- 9	-0,31	- 7	-0,24	2	0,07	0	0	- 5	-0,18
-0,55	-19	-0,66	-13	-0,45	-11	-0,38	- 7	-0,24	0	0	- 2	-0,07	- 5	-0,18
-0,62	-20	-0,69	-14	-0,48	-11	-0,38	-10	-0,34	- 1	-0,04	- 2	-0,07	- 7	-0,25
-0,55	-20	-0,69	-13	-0,45	-12	-0,41	- 9	-0,31	- 3	-0,11	- 3	-0,10	- 7	-0,25
-0,62	-20	-0,69	-16	-0,55	-14	-0,48	-13	-0,45	- 5	-0,18	- 7	-0,24	-13	-0,46
-0,75	-23	-0,79	-20	-0,69	-17	-0,59	-14	-0,48	-10	-0,36	-11	-0,38	-16	-0,57
-0,82	-26	-0,90	-25	-0,86	-23	-0,79	-18	-0,62	-14	-0,50	-17	-0,59	-22	-0,79
-0,96	-30	-1,03	-34	-1,17	-27	-0,93	-21	-0,72	-22	-0,79	-24	-0,83	-28	-1,00
-1,03	-34	-1,17	-36	-1,24	-32	-1,10	-26	-0,90	-27	-0,96	-30	-1,03	-35	-1,25
-1,17	-38	-1,31	-49	-1,69	-38	-1,31	-33	-1,14	-37	-1,32	-38	-1,31	-44	-1,57
-1,37	-44	-1,52	-52	-1,79	-45	-1,55	-38	-1,31	-47	-1,68	-46	-1,59	-52	-1,86
-1,58	-50	-1,72	-60	-2,07	-50	-1,72	-42	-1,45	-53	-1,89	-53	-1,83	-56	-2,00
-1,71	-50	-1,72	-60	-2,07	-53	-1,83	-45	-1,55	-55	-1,96	-53	-1,83	-58	-2,07
-1,58	-47	-1,62	-58	-2,00	-51	-1,76	-44	-1,52	-52	-1,86	-50	-1,72	-53	-1,89
-1,37	-39	-1,34	-50	-1,72	-40	-1,38	-34	-1,17	-42	-1,50	-42	-1,45	-46	-1,64
-0,96	-30	-1,03	-38	-1,31	-28	-0,97	-23	-0,79	-31	-1,11	-26	-0,90	-32	-1,14
-0,48	-16	-0,55	-20	-0,69	-13	-0,45	-10	-0,34	-11	-0,39	-14	-0,74	-18	-0,64
0	- 3	-0,10	- 2	-0,07	3	0,10	+ 7	+0,24	7	0,25	5	0,17	0	0
0,67	9	0,31	19	0,66	18	0,62	20	0,69	26	0,93	20	0,69	20	0,71
1,10	21	0,72	38	1,31	32	1,10	34	1,17	42	1,50	35	1,21	33	1,18
1,51	28	0,97	51	1,76	45	1,55	44	1,52	58	2,07	50	1,72	48	1,71
1,71	35	1,21	62	2,14	52	1,79	56	1,93	68	2,43	58	2,00	58	2,07
1,85	37	1,28	71	2,45	60	2,07	57	1,97	75	2,68	66	2,28	63	2,25
1,92	38	1,31	75	2,59	60	2,07	60	2,07	80	2,86	70	2,41	66	2,36
1,85	37	1,28	77	2,66	60	2,07	58	2,00	79	2,82	70	2,41	68	2,43
1,78	33	1,14	70	2,41	57	1,97	58	2,00	74	2,64	70	2,41	66	2,36
1,51	30	1,03	67	2,31	51	1,76	53	1,83	70	2,50	67	2,31	63	2,25
1,37	28	0,97	65	2,24	47	1,62	48	1,66	65	2,32	65	2,24	60	2,14
1,23	24	0,83	58	2,00	43	1,48	44	1,52	62	2,21	60	2,07	58	2,07
1,17	24	0,83	55	1,90	40	1,38	42	1,45	58	2,07	60	2,07	57	2,04
1,17	24	0,83	51	1,76	38	1,31	40	1,37	58	2,07	59	2,03	56	2,00



	RANGEE N°6						RANGEE N°7							
	TUBE N°52 (OII)		TUBE N°56 (NII)		TUBE N°58 (LII)		TUBE N°61 (PI)		TUBE N°65 (RI)		TUBE N°67 (SI)		TUBE N°72 (JII)	
	P_o = - 556 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 110,61 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 584 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 110,61 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 625 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 122,57 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 480 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 104,63 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 464 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 107,62 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 174°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 467 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 109,12 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 173,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 565 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 136,02 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE	
θ	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp
0	103	2,59	108	2,75	115	2,93	82	1,94	77	2,07	82	2,09	104	2,62
5	102	2,57	110	2,80	116	2,98	80	1,89	80	2,15	85	2,17	104	2,62
10	104	2,62	114	2,91	122	3,11	80	1,89	85	2,28	92	2,34	104	2,62
15	106	2,67	126	3,21	130	3,31	85	2,01	90	2,42	100	2,55	108	2,72
20	108	2,72	120	3,06	146	3,72	85	2,01	95	2,55	105	2,68	110	2,77
25	112	2,82	122	3,11	136	3,47	85	2,01	105	2,82	108	2,75	112	2,82
30	110	2,77	120	3,06	136	3,47	87	2,06	105	2,82	110	2,80	110	2,77
35	108	2,72	116	2,96	134	3,42	81	1,92	102	2,74	105	2,68	104	2,62
40	100	2,52	106	2,70	122	3,11	75	1,78	90	2,42	95	2,42	94	2,37
45	82	2,06	88	2,24	106	2,70	63	1,49	77	2,07	75	1,91	80	2,01
50	64	1,61	66	1,68	85	2,17	48	1,14	60	1,61	60	1,53	60	1,51
55	46	1,16	44	1,12	58	1,48	30	0,71	42	1,13	43	1,10	42	1,06
60	23	0,56	18	0,45	32	0,82	10	0,24	18	0,48	20	0,51	19	0,48
65	- 3	-0,08	- 12	-0,31	4	0,10	- 12	-0,28	0	0	0	0	- 8	-0,20
70	- 24	-0,60	- 38	-0,97	- 25	-0,64	- 31	-0,73	- 20	-0,54	- 20	-0,51	- 31	-0,78
75	- 45	-1,13	- 60	-1,59	- 48	-1,22	- 50	-1,18	- 40	-1,07	- 40	-1,02	- 51	-1,21
80	- 62	-1,56	- 79	-2,01	- 68	-1,73	- 62	-1,47	- 53	-1,42	- 55	-1,40	- 67	-1,69
85	- 73	-1,84	- 90	-2,29	- 80	-2,04	- 70	-1,66	- 60	-1,61	- 65	-1,56	- 77	-1,94
90	- 78	-1,99	-104	-2,65	- 88	-2,24	- 72	-1,70	- 65	-1,75	- 67	-1,71	- 80	-2,01
95	- 72	-1,81	- 88	-2,24	- 83	-2,11	- 65	-1,54	- 62	-1,67	- 62	-1,58	- 78	-1,96
100	- 63	-1,59	- 78	-2,00	- 71	-1,81	- 58	-1,37	- 55	-1,48	- 55	-1,40	- 68	-1,71
105	- 53	-1,33	- 65	-1,66	- 67	-1,71	- 50	-1,18	- 45	-1,21	- 46	-1,17	- 59	-1,48
110	- 40	-1,00	- 52	-1,32	- 46	-1,17	- 41	-0,97	- 38	-1,02	- 35	-0,89	- 45	-1,13
115	- 30	-0,75	- 38	-0,97	- 32	-0,82	- 34	-0,80	- 25	-0,67	- 30	-0,76	- 35	-0,88
120	- 19	-0,48	- 23	-0,59	- 18	-0,46	- 22	-0,52	- 15	-0,40	- 18	-0,46	- 25	-0,63
125	- 9	-0,23	- 15	-0,38	- 8	-0,20	- 15	-0,36	- 8	-0,21	- 10	-0,25	- 15	-0,38
130	- 4	-0,10	- 6	-0,15	0	0	- 9	-0,21	- 3	-0,08	- 5	-0,13	- 8	-0,20
140	4	0,10	0	0	8	0,20	- 2	-0,05	0	0	0	0	0	0
150	6	0,15	3	0,08	10	0,25	- 2	-0,05	0	0	0	0	2	0,05
160	8	0,20	5	0,11	11	0,28	- 2	-0,05	0	0	1	0,03	4	0,10
170	10	0,25	7	0,18	14	0,36	0	0	0	0	4	0,10	5	0,13
180	12	0,30	9	0,23	16	0,41	2	0,05	4	0,11	4	0,10	7	0,18
-170	11	0,28	7	0,18	16	0,41	2	0,05	5	0,13	4	0,10	7	0,18
-160	8	0,20	5	0,13	14	0,36	0	0	0	0	2	0,05	5	0,13
-150	8	0,20	4	0,10	11	0,28	0	0	0	0	0	0	5	0,13
-140	5	0,13	2	0,05	11	0,28	- 2	-0,05	0	0	0	0	0	0
-130	0	0	- 5	-0,13	4	0,10	- 8	-0,19	- 5	-0,13	- 6	-0,15	- 6	-0,15
-125	- 8	-0,20	- 8	-0,20	- 5	-0,13	- 15	-0,36	- 10	-0,27	- 11	-0,28	- 13	-0,33
-120	- 19	-0,48	- 25	-0,64	- 18	-0,46	- 20	-0,47	- 20	-0,54	- 18	-0,46	- 22	-0,55
-115	- 30	-0,75	- 37	-0,94	- 30	-0,76	- 28	-0,66	- 28	-0,75	- 27	-0,69	- 33	-0,81
-110	- 42	-1,06	- 51	-1,30	- 46	-1,17	- 37	-0,88	- 36	-0,97	- 38	-0,97	- 45	-0,11
-105	- 55	-1,38	- 78	-1,99	- 61	-1,55	- 50	-1,18	- 48	-1,29	- 48	-1,22	- 60	-1,51
-100	- 69	-1,74	- 88	-2,24	- 80	-2,04	- 63	-1,49	- 58	-1,56	- 60	-1,53	- 73	-1,84
- 95	- 81	-2,04	- 98	-2,50	- 92	-2,35	- 75	-1,78	- 70	-1,88	- 65	-1,66	- 85	-2,10
- 90	- 84	-2,11	-102	-2,60	- 95	-2,42	- 78	-1,85	- 68	-1,83	- 70	-1,78	- 88	-2,21
- 85	- 80	-2,01	- 96	-2,45	- 90	-2,29	- 72	-1,70	- 64	-1,72	- 65	-1,60	- 84	-2,11
- 80	- 68	-1,71	- 82	-2,09	- 75	-1,91	- 65	-1,54	- 55	-1,48	- 55	-1,40	- 71	-1,79
- 75	- 48	-1,21	- 60	-1,53	- 54	-1,38	- 48	-1,14	- 42	-1,13	- 42	-1,07	- 54	-1,36
- 70	- 26	-0,65	- 35	-0,89	- 30	-0,76	- 23	-0,54	- 25	-0,67	- 25	-0,64	- 30	-0,75
- 65	- 2	-0,05	- 6	-0,15	+ 25	0,64	0	0	- 2	-0,05	- 5	-0,13	- 3	-0,08
- 60	25	0,63	+ 20	+0,51	58	1,48	26	0,62	15	0,40	15	0,38	24	0,60
- 55	50	1,25	50	1,27	81	2,06	50	1,18	40	1,07	35	0,89	50	1,26
- 50	75	1,89	75	1,91	102	2,60	72	1,70	55	1,48	52	1,33	74	1,86
- 45	92	2,31	102	2,60	120	3,06	87	2,06	70	1,88	67	1,71	96	2,42
- 40	110	2,77	116	2,96	130	3,31	105	2,49	80	2,15	78	1,99	110	2,77
- 35	120	3,02	125	3,19	135	3,44	115	2,72	90	2,42	82	2,09	124	3,12
- 30	125	3,15	130	3,31	132	3,36	115	2,72	95	2,55	88	2,24	126	3,17
- 25	125	3,15	130	3,31	130	3,31	116	2,73	95	2,55	88	2,24	128	3,22
- 20	122	3,07	128	3,26	128	3,26	112	2,65	90	2,42	85	2,17	126	3,17
- 15	118	2,97	120	3,06	124	3,16	106	2,51	90	2,42	85	2,17	120	3,02
- 10	110	2,77	116	2,60	118	3,00	100	2,37	85	2,28	82	2,09	114	2,87
- 5	108	2,72	114	2,91	114	2,91	95	2,25	82	2,20	82	2,09	110	2,77
0	105	2,64	112	2,85	114	2,91	90	2,13	80	2,15	83	2,12	105	2,64

RANGEE N°8				RANGEE N°9						RANGEE N°10					
TUBE N°76 (HII)		TUBE N°78 (GII)		TUBE N°81 (UI)		TUBE N°85 (WI)		TUBE N°87 (XI)		TUBE N°92 (KII)		TUBE N°96 (CII)		TUBE N°98 (BII)	
p_o = - 545 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 131,54 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 585 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 140,51 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 468 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 130,05 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 468 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 128,55 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 467 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 130,05 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 504 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 143,50 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 582 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 164,42 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 495 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 134,53 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE	
Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp
100	2,52	104	2,62	85	2,04	80	1,94	80	2,12	90	2,26	95	2,36	67	1,71
102	2,57	108	2,72	85	2,04	80	1,94	81	2,15	90	2,26	102	2,53	71	1,81
104	2,62	114	2,87	88	2,11	85	2,06	85	2,25	90	2,26	108	2,68	75	1,91
110	2,77	120	3,02	90	2,16	90	2,18	92	2,44	92	2,31	112	2,78	82	2,09
112	2,82	125	3,15	95	2,28	95	2,30	102	2,70	94	2,37	120	2,98	88	2,24
114	2,87	130	3,27	102	2,44	102	2,47	105	2,78	95	2,39	125	3,11	88	2,24
115	2,89	128	3,22	102	2,44	102	2,47	105	2,78	95	2,39	120	2,98	87	2,22
110	2,77	124	3,12	100	2,40	100	2,42	102	2,70	92	2,31	118	2,93	84	2,14
102	2,57	112	2,82	95	2,28	85	2,06	95	2,52	82	2,06	108	2,68	72	1,84
88	2,21	98	2,47	78	1,87	75	1,82	75	1,99	75	1,89	92	2,29	58	1,48
70	1,76	74	1,86	64	1,53	60	1,45	60	1,59	58	1,46	72	1,79	42	1,07
47	1,18	47	1,18	42	1,00	40	0,97	40	1,06	39	0,98	50	1,24	20	0,51
20	0,50	20	0,50	25	0,60	20	0,48	20	0,53	20	0,50	20	0,50	- 3	0,07
- 4	-0,10	- 4	-0,10	0	0	0	0	- 5	-0,13	0	0	- 4	-0,09	- 30	-0,76
- 30	-0,75	- 33	-0,83	- 18	-0,43	- 22	-0,53	- 22	-0,58	- 22	-0,55	- 33	-0,82	- 48	-1,22
- 50	-1,26	- 55	-1,38	- 36	-0,86	- 41	-0,99	- 39	-1,03	- 41	-1,03	- 58	-1,44	- 70	-1,78
- 68	-1,71	- 75	-1,89	- 50	-1,20	- 55	-1,33	- 52	-1,38	- 57	-1,43	- 75	-1,86	- 87	-2,22
- 78	-1,96	- 88	-2,21	- 60	-1,44	- 65	-1,58	- 62	-1,64	- 66	-1,66	- 86	-2,14	- 98	-2,50
- 82	-2,06	- 90	-2,26	- 68	-1,63	- 68	-1,65	- 65	-1,72	- 72	-1,81	- 92	-2,29	-100	-2,55
- 78	-1,96	- 82	-2,06	- 60	-1,44	- 65	-1,58	- 62	-1,64	- 73	-1,83	- 88	-2,19	- 95	-2,42
- 68	-1,71	- 74	-1,86	- 55	-1,32	- 60	-1,45	- 52	-1,38	- 65	-1,64	- 78	-1,94	- 84	-2,14
- 57	-1,43	- 60	-1,51	- 45	-1,08	- 48	-1,16	- 45	-1,19	- 55	-1,38	- 65	-1,62	- 70	-1,78
- 46	-1,16	- 48	-1,21	- 37	-0,87	- 40	-0,97	- 37	-0,98	- 44	-1,11	- 52	-1,29	- 62	-1,58
- 34	-0,86	- 38	-0,96	- 28	-0,67	- 32	-0,78	- 28	-0,74	- 35	-0,88	- 40	-0,99	- 52	-1,33
- 22	-0,55	- 25	-0,63	- 20	-0,48	- 20	-0,48	- 18	-0,48	- 27	-0,68	- 28	-0,70	- 42	-1,07
- 11	-0,30	- 14	-0,35	- 10	-0,24	- 15	-0,36	- 12	-0,32	- 19	-0,48	- 17	-0,42	- 35	-0,89
- 7	-0,18	- 8	-0,20	- 5	-0,12	- 10	-0,24	- 7	-0,18	- 10	-0,25	- 8	-0,20	- 30	-0,76
0	0	0	0	0	0	- 2	-0,05	- 2	-0,05	- 3	-0,08	0	0	- 22	-0,56
2	0,05	0	0	0	0	- 2	-0,05	0	0	0	0	- 6	-0,15	- 20	-0,51
4	0,10	0	0	3	0,07	0	0	2	0,05	0	0	- 5	-0,12	- 19	-0,48
6	0,15	3	0,07	3	0,07	0	0	4	0,11	0	0	0	0	- 20	-0,51
7	0,18	5	0,13	6	0,14	3	0,07	5	0,13	2	0,05	- 2	-0,04	- 18	-0,46
6	0,15	5	0,13	6	0,14	3	0,07	4	0,11	2	0,05	0	0	- 18	-0,46
3	0,07	2	0,05	3	0,07	0	0	2	0,05	0	0	- 2	-0,04	- 20	-0,51
3	0,07	0	0	2	0,05	0	0	2	0,05	0	0	0	0	- 22	-0,56
1	0,03	- 2	-0,05	0	0	0	0	0	0	- 2	-0,05	0	0	- 23	-0,58
- 5	-0,13	- 8	-0,20	- 2	-0,05	- 10	-0,24	- 5	-0,13	- 8	-0,20	- 8	-0,20	- 32	-0,82
- 10	-0,25	- 16	-0,40	- 7	-0,17	- 14	-0,34	- 10	-0,27	- 14	-0,35	- 15	-0,37	- 38	-0,97
- 22	-0,55	- 25	-0,63	- 16	-0,38	- 22	-0,53	- 20	-0,53	- 22	-0,55	- 25	-0,62	- 44	-1,12
- 32	-0,81	- 36	-0,91	- 23	-0,55	- 30	-0,73	- 26	-0,69	- 30	-0,75	- 40	-0,99	- 54	-1,38
- 44	-1,11	- 51	-1,28	- 35	-0,84	- 40	-0,97	- 35	-0,93	- 41	-1,03	- 50	-1,24	- 63	-1,61
- 58	-1,46	- 65	-1,64	- 43	-1,03	- 50	-1,21	- 45	-1,19	- 52	-1,31	- 68	-1,69	- 75	-1,91
- 75	-1,89	- 80	-2,01	- 57	-1,37	- 60	-1,45	- 55	-1,46	- 66	-1,66	- 85	-2,11	- 88	-2,24
- 87	-2,19	- 92	-2,31	- 65	-1,56	- 70	-1,70	- 62	-1,64	- 77	-1,94	- 92	-2,29	-100	-2,55
- 88	-2,21	- 95	-2,39	- 70	-1,68	- 70	-1,70	- 65	-1,72	- 83	-2,09	- 95	-2,36	-100	-2,55
- 84	-2,11	- 88	-2,21	- 67	-1,60	- 68	-1,65	- 65	-1,72	- 79	-1,99	- 88	-2,19	- 92	-2,35
- 72	-1,82	- 75	-1,09	- 58	-1,39	- 58	-1,41	- 53	-1,40	- 69	-1,74	- 73	-1,81	- 78	-1,99
- 55	-1,38	- 58	-1,46	- 47	-1,26	- 45	-1,09	- 40	-1,06	- 54	-1,36	- 55	-1,37	- 62	-1,58
- 34	-0,86	- 34	-0,86	- 28	-0,67	- 26	-0,63	- 23	-0,61	- 35	-0,88	- 32	-0,79	- 46	-1,17
- 6	-0,15	- 6	-0,15	- 5	-0,12	- 8	-0,19	- 2	-0,05	- 12	-0,30	- 8	-0,20	- 25	-0,64
18	0,45	20	0,50	20	0,48	18	0,44	17	0,45	12	0,30	2	0,04	0	0
45	1,13	45	1,13	40	0,96	40	0,97	40	1,06	36	0,91	37	0,92	3	0,07
68	1,71	66	1,66	60	1,44	55	1,33	55	1,46	58	1,46	64	1,59	30	0,76
87	2,19	87	2,19	75	1,80	70	1,70	68	1,80	76	1,91	85	2,11	46	1,17
104	2,62	102	2,57	90	2,16	80	1,94	78	2,07	95	2,39	105	2,61	60	1,53
112	2,82	108	2,72	105	2,51	88	2,13	85	2,25	105	2,64	115	2,86	68	1,73
116	2,92	112	2,82	110	2,63	93	2,26	89	2,36	110	2,77	120	2,98	73	1,86
118	2,97	114	2,87	108	2,59	94	2,28	89	2,36	110	2,77	120	2,98	72	1,84
115	2,89	110	2,77	105	2,51	94	2,28	85	2,25	110	2,77	116	2,88	70	1,78
110	2,77	108	2,72	100	2,40	88	2,13	83	2,20	104	2,62	114	2,83	65	1,66
106	2,67	105	2,64	95	2,28	85	2,06	85	2,25	100	2,51	108	2,68	65	1,66
102	2,57	102	2,57	94	2,25	84	2,04	82	2,17	95	2,39	105	2,61	63	1,61
100	2,52	104	2,62	90	2,16	82	1,99	80	2,12	92	2,31	105	2,61	65	1,66

	RANGEE N°1						RANGEE N°2						RANGEE N°3					
	TUBE N°21 (AI)		TUBE N°25 (CI)		TUBE N°27 (DI)		TUBE N°12 (VII)		TUBE N°16 (WII)		TUBE N°18 (VII)		TUBE N°21 (FI)		TUBE N°25 (HI)		TUBE N°27	
	p_o = - 498 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 44,25 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 498 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 42,45 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 496 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 43,35 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 491 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 53,81 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 517 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 55,31 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 500 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 53,21 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 512 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 64,28 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 173°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 515 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 62,78 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		p_o = - 464 mm $p_o - p_{réf}$ = 58,3 V_o = 17,3 T_o = 173 1 mV = 0,29
θ	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	
0	144	3,41	155	3,95	155	3,95	- 37	-0,93	- 24	-0,60	- 41	-1,03	45	1,09	53	1,35	32	
5	138	3,27	150	3,82	155	3,95	- 32	-0,81	- 23	-0,58	- 42	-1,06	42	1,02	55	1,40	38	
10	140	3,31	150	3,82	152	3,87	- 29	-0,73	- 31	-0,78	- 38	-0,96	45	1,12	55	1,40	43	
15	120	2,84	145	3,70	148	3,77	- 25	-0,63	- 28	-0,70	- 23	-0,58	46	1,12	62	1,58	48	
20	105	2,49	145	3,70	135	3,44	- 22	-0,55	- 18	-0,45	- 3	-0,08	50	1,27	55	1,40	57	
25	90	2,13	120	3,06	125	3,19	- 16	-0,40	0	0	35	0,88	53	1,29	60	1,53	63	
30	68	1,61	100	2,55	110	2,80	- 11	-0,28	20	0,50	54	1,36	55	1,33	66	1,68	68	
35	52	1,23	82	2,09	90	2,29	- 5	-0,13	41	1,03	84	2,11	55	1,33	68	1,73	70	
40	35	0,83	60	1,53	65	1,66	0	0	60	1,51	106	2,67	52	1,26	65	1,66	68	
45	12	0,28	40	1,02	45	1,15	7	0,18	73	1,84	114	2,87	48	1,16	60	1,53	60	
50	- 8	-0,19	15	0,38	22	0,56	13	0,33	77	1,94	110	2,77	40	0,97	50	1,27	49	
55	- 27	-0,61	- 8	-0,20	0	0	11	0,28	75	1,89	98	2,47	27	0,65	35	0,89	34	
60	- 45	-1,07	- 25	-0,64	- 23	-0,59	10	0,25	60	1,51	72	1,81	14	0,34	18	0,46	12	
65	- 60	-1,42	- 45	-1,15	- 46	-1,17	0	0	40	1,00	42	1,06	- 5	-0,12	- 5	-0,13	- 10	
70	- 69	-1,63	- 46	-1,17	- 62	-1,58	- 12	-0,30	13	0,35	12	0,30	- 18	-0,44	- 25	-0,64	- 28	
75	- 70	-1,66	- 72	-1,83	- 68	-1,73	- 22	-0,55	- 10	-0,25	- 22	-0,55	- 35	-0,85	- 42	-1,07	- 46	
80	- 70	-1,66	- 71	-1,81	- 77	-1,96	- 31	-0,78	- 32	-0,81	- 45	-1,13	- 46	-1,12	- 60	-1,53	- 60	
85	- 60	-1,42	- 65	-1,66	- 60	-1,53	- 40	-1,00	- 48	-1,21	- 58	-1,46	- 52	-1,26	- 67	-1,71	- 70	
90	- 55	-1,30	- 54	-1,38	- 46	-1,17	- 45	-1,13	- 54	-1,36	- 59	-1,48	- 57	-1,38	- 73	-1,86	- 73	
95	- 50	-1,18	- 48	-1,22	- 42	-1,07	- 46	-1,16	- 52	-1,31	- 51	-1,28	- 55	-1,33	- 72	-1,83	- 66	
100	- 50	-1,18	- 48	-1,22	- 42	-1,07	- 42	-1,05	- 44	-1,11	- 39	-0,98	- 50	-1,21	- 65	-1,66	- 60	
105	- 50	-1,18	- 50	-1,27	- 42	-1,07	- 40	-1,00	- 35	-0,88	- 32	-0,81	- 42	-1,02	- 58	-1,48	- 52	
110	- 50	-1,18	- 48	-1,22	- 45	-1,15	- 32	-0,81	- 28	-0,70	- 27	-0,68	- 37	-0,90	- 50	-1,27	- 47	
115	- 52	-1,23	- 49	-1,25	- 45	-1,15	- 28	-0,70	- 20	-0,50	- 20	-0,50	- 32	-0,78	- 43	-1,10	- 42	
120	- 52	-1,23	- 50	-1,27	- 45	-1,15	- 25	-0,63	- 14	-0,35	- 15	-0,38	- 26	-0,63	- 40	-1,02	- 27	
125	- 54	-1,28	- 52	-1,33	- 48	-1,22	- 19	-0,48	- 10	-0,25	- 11	-0,28	- 20	-0,48	- 35	-0,89	- 32	
130	- 54	-1,28	- 52	-1,33	- 48	-1,22	- 17	-0,43	- 6	-0,15	- 8	-0,20	- 18	-0,44	- 32	-0,82	- 32	
140	- 55	-1,30	- 52	-1,33	- 48	-1,22	- 15	-0,38	- 6	-0,15	- 8	-0,20	- 15	-0,36	- 30	-0,76	- 32	
150	- 54	-1,28	- 50	-1,27	- 49	-1,25	- 15	-0,38	- 7	-0,18	- 9	-0,23	- 15	-0,36	- 28	-0,71	- 32	
160	- 54	-1,28	- 50	-1,27	- 45	-1,15	- 4	-0,10	- 8	-0,20	- 9	-0,23	- 13	-0,32	- 28	-0,71	- 32	
170	- 50	-1,18	- 52	-1,33	- 50	-1,27	- 11	-0,28	- 6	-0,15	- 6	-0,15	- 10	-0,24	- 25	-0,64	- 30	
180	- 60	-1,18	- 55	-1,40	- 50	-1,27	- 8	-0,20	- 4	-0,10	- 6	-0,15	- 10	-0,24	- 22	-0,56	- 24	
-170	- 52	-1,23	- 55	-1,40	- 52	-1,33	- 10	-0,25	- 7	-0,18	- 7	-0,18	- 12	-0,29	- 25	-0,64	- 26	
-160	- 53	-1,25	- 58	-1,48	- 52	-1,33	- 12	-0,30	- 10	-0,25	- 9	-0,23	- 15	-0,36	- 30	-0,76	- 28	
-150	- 53	-1,25	- 58	-1,48	- 52	-1,33	- 13	-0,33	- 9	-0,23	- 9	-0,23	- 18	-0,44	- 32	-0,82	- 30	
-140	- 53	-1,25	- 58	-1,48	- 46	-1,17	- 13	-0,33	- 8	-0,20	- 10	-0,25	- 18	-0,44	- 32	-0,82	- 30	
-130	- 50	-1,18	- 56	-1,43	- 51	-1,30	- 12	-0,30	- 8	-0,20	- 10	-0,25	- 20	-0,48	- 32	-0,82	- 31	
-125	- 52	-1,23	- 57	-1,45	- 50	-1,27	- 12	-0,30	- 12	-0,30	- 12	-0,30	- 20	-0,48	- 35	-0,89	- 30	
-120	- 50	-1,18	- 55	-1,40	- 50	-1,27	- 14	-0,35	- 15	-0,38	- 16	-0,40	- 28	-0,68	- 38	-0,97	- 38	
-115	- 50	-1,18	- 54	-1,38	- 50	-1,27	- 17	-0,43	- 18	-0,45	- 20	-0,50	- 32	-0,78	- 43	-1,10	- 40	
-110	- 48	-1,14	- 52	-1,33	- 50	-1,27	- 20	-0,50	- 23	-0,58	- 28	-0,70	- 40	-0,97	- 49	-1,25	- 46	
-105	- 50	-1,18	- 52	-1,33	- 49	-1,25	- 21	-0,53	- 30	-0,75	- 32	-0,81	- 46	-1,12	- 58	-1,48	- 55	
-100	- 48	-1,14	- 55	-1,40	- 48	-1,22	- 30	-0,75	- 40	-1,00	- 40	-1,00	- 60	-1,45	- 68	-1,73	- 62	
- 95	- 50	-1,18	- 55	-1,40	- 50	-1,27	- 56	-1,41	- 45	-1,13	- 43	-1,08	- 71	-1,72	- 78	-1,99	- 70	
- 90	- 56	-1,33	- 60	-1,53	- 53	-1,35	- 68	-1,71	- 42	-1,06	- 42	-1,06	- 76	-1,84	- 82	-2,09	- 74	
- 85	- 78	-1,85	- 78	-1,99	- 64	-1,63	- 62	-1,56	- 36	-0,91	- 40	-1,00	- 68	-1,65	- 78	-1,99	- 68	
- 80	- 80	-1,89	- 88	-2,24	- 80	-2,04	- 45	-1,13	- 22	-0,55	- 30	-0,75	- 56	-1,36	- 65	-1,66	- 61	
- 75	- 73	-1,73	- 83	-2,12	- 82	-2,09	- 22	-0,55	- 4	-0,10	- 19	-0,48	- 38	-0,92	- 52	-1,33	- 45	
- 70	- 58	-1,37	- 72	-1,83	- 72	-1,83	6	0,15	4	0,10	- 8	-0,20	- 15	-0,36	- 33	-0,84	- 30	
- 65	- 41	-0,97	- 57	-1,45	- 60	-1,53	40	1,00	28	0,70	0	0	10	0,24	- 10	-0,25	- 14	
- 60	- 20	-0,47	- 36	-0,92	- 38	-0,97	75	1,89	40	1,00	8	0,20	35	0,85	15	0,38	7	
- 55	4	0,09	- 15	-0,38	- 20	-0,51	104	2,62	45	1,13	10	0,25	55	1,33	34	0,87	22	
- 50	28	0,66	10	0,25	4	0,10	120	3,02	43	1,08	10	0,26	75	1,82	51	1,30	32	
- 45	50	1,18	31	0,79	30	0,76	122	3,07	35	0,88	8	0,20	88	2,13	60	1,53	43	
- 40	71	1,68	54	1,38	50	1,27	115	2,89	20	0,50	0	0	95	2,30	70	1,78	48	
- 35	90	2,13	78	1,99	72	1,83	95	2,39	10	0,25	- 6	-0,15	95	2,30	73	1,86	48	
- 30	105	2,49	95	2,42	92	2,34	60	1,51	- 6	-0,15	- 9	-0,23	92	2,23	68	1,73	48	
- 25	124	2,93	115	2,93	112	2,85	30	0,75	- 16	-0,40	- 13	-0,33	80	1,94	+ 64	1,63	43	
- 20	130	3,08	130	3,31	125	3,19	2	0,05	- 16	-0,40	- 17	-0,43	72	1,75	60	1,53	40	
- 15	140	3,31	140	3,57	138	3,52	- 20	-0,50	- 16	-0,40	- 23	-0,58	60	1,45	54	1,38	37	
- 10	144	3,41	145	3,70	148	3,77	- 36	-0,91	- 17	-0,43	- 29	-0,73	53	1,29	47	1,20	34	
- 5	145	3,43	150	3,82	150	3,82	- 40	-1,00	- 18	-0,45	- 36	-0,91	45	1,09	45	1,15	33	
0	142	3,36	155	3,95	155	3,95	- 37	-0,93	- 21	-0,53	- 41	-1,03	44	1,07	43	1,10	33	

	RANGEE N°4						RANGEE N°5					
(II)	TUBE N°32 (TII)		TUBE N°36 (RII)		TUBE N°38 (QII)		TUBE N°41 (KI)		TUBE N°45 (MI)		TUBE N°47 (NI)	
CE 0 mm CE m/s C mm CE	P_o = - 540 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 81,61 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 469 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 73,24 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 530 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 79,52 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 471 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 82,21 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 470 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 80,72 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 173°C 1 mV = 0,29 mm CE		P_o = - 470 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 81,91 mm CE V_o = 17,3 m/s T_o = 172,5°C 1 mV = 0,29 mm CE	
Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp
0,80	78	1,96	62	1,56	68	1,71	80	2,12	80	2,27	75	1,91
0,94	75	1,88	62	1,56	69	1,74	80	2,12	78	2,21	78	1,98
1,07	75	1,88	64	1,61	70	1,76	83	2,20	85	2,41	80	2,03
1,19	78	1,96	66	1,66	75	1,88	86	2,28	85	2,41	90	2,29
1,42	80	2,01	71	1,79	78	1,96	90	2,39	90	2,56	90	2,29
1,57	82	2,06	75	1,89	80	2,01	94	2,49	90	2,56	100	2,54
1,69	84	2,11	78	1,96	80	2,01	90	2,39	94	2,67	100	2,54
1,74	80	2,01	80	2,01	80	2,01	90	2,39	90	2,56	95	2,41
1,69	74	1,86	76	1,91	73	1,84	80	2,12	80	2,27	90	2,29
1,49	68	1,71	71	1,79	65	1,64	70	1,86	72	2,04	78	1,98
1,22	52	1,31	59	1,48	50	1,26	54	1,43	58	1,65	60	1,52
0,84	38	0,96	46	1,15	33	0,83	39	1,03	40	1,14	43	1,09
0,30	19	0,48	25	0,63	12	0,30	20	0,57	20	0,57	20	0,51
-0,25	- 4	-0,10	7	0,18	- 5	-0,13	0	0	0	0	0	0
-0,70	- 26	-0,65	- 12	-0,20	- 26	-0,65	- 18	-0,48	- 20	-0,57	- 20	-0,51
-1,14	- 43	-1,08	- 31	-0,78	- 42	-1,06	- 38	-1,00	- 38	-1,08	- 38	-0,97
-1,49	- 59	-1,48	- 47	-1,18	- 58	-1,46	- 50	-1,33	- 52	-1,48	- 53	-1,35
-1,74	- 65	-1,64	- 54	-1,36	- 67	-1,69	- 55	-1,46	- 58	-1,65	- 64	-1,63
-1,81	- 72	-1,81	- 60	-1,51	- 68	-1,71	- 58	-1,54	- 60	-1,70	- 65	-1,65
-1,64	- 68	-1,71	- 57	-1,43	- 65	-1,64	- 55	-1,46	- 55	-1,56	- 60	-1,52
-1,49	- 60	-1,51	- 50	-1,26	- 58	-1,46	- 50	-1,33	- 50	-1,42	- 50	-1,27
-1,29	- 52	-1,31	- 41	-1,03	- 48	-1,21	- 40	-1,06	- 42	-1,19	- 42	-1,07
-1,17	- 40	-1,00	- 32	-0,81	- 40	-1,00	- 30	-0,80	- 33	-0,94	- 35	-0,89
-1,04	- 34	-0,86	- 25	-0,63	- 30	-0,75	- 25	-0,66	- 25	-0,71	- 22	-0,56
-0,67	- 23	-0,58	- 19	-0,48	- 25	-0,63	- 18	-0,48	- 15	-0,43	- 17	-0,43
-0,80	- 16	-0,40	- 14	-0,35	- 19	-0,48	- 10	-0,27	- 10	-0,28	- 10	-0,25
-0,80	- 11	-0,28	- 10	-0,25	- 15	-0,38	- 7	-0,19	- 5	-0,14	- 4	-0,10
-0,80	- 5	-0,13	- 7	-0,18	- 11	-0,28	- 2	-0,05	0	0	0	0
-0,80	- 3	-0,07	- 7	-0,18	- 10	-0,25	0	0	4	0,11	0	0
-0,80	- 3	-0,07	- 6	-0,15	- 9	-0,23	0	0	5	0,14	0	0
-0,75	0	0	- 2	-0,05	- 5	-0,13	5	0,13	5	0,14	2	0,05
-0,60	0	0	0	0	- 2	-0,05	5	0,13	6	0,17	4	0,10
-0,65	- 2	-0,05	0	0	- 2	-0,05	5	0,13	5	0,14	2	0,05
-0,70	- 5	-0,13	- 3	-0,07	- 3	-0,07	0	0	4	0,11	0	0
-0,75	- 5	-0,13	- 4	-0,10	- 7	-0,18	0	0	5	0,14	0	0
-0,75	- 8	-0,20	- 4	-0,10	- 5	-0,13	0	0	0	0	0	0
-0,77	- 11	-0,28	- 8	-0,20	- 11	-0,28	- 8	-0,21	- 5	-0,14	- 8	-0,20
-0,75	- 16	-0,40	- 13	-0,33	- 15	-0,38	- 10	-0,27	- 12	-0,34	- 14	-0,36
-0,94	- 20	-0,50	- 19	-0,48	- 23	-0,58	- 20	-0,53	- 20	-0,57	- 20	-0,51
-0,99	- 17	-0,43	- 26	-0,65	- 29	-0,73	- 30	-0,80	- 30	-0,85	- 30	-0,76
-1,14	- 35	-0,88	- 35	-0,88	- 38	-0,96	- 38	-1,00	- 38	-1,08	- 38	-0,97
-1,37	- 45	-1,13	- 44	-0,11	- 48	-1,21	- 50	-1,33	- 50	-1,42	- 48	-1,22
-1,54	- 60	-1,51	- 55	-1,38	- 60	-1,51	- 65	-1,72	- 62	-1,76	- 60	-1,52
-1,74	- 66	-1,66	- 65	-1,64	- 70	-1,76	- 75	-1,99	- 70	-1,99	- 67	-1,70
-1,84	- 70	-1,76	- 66	-1,66	- 72	-1,81	- 77	-2,04	- 70	-1,99	- 67	-1,70
-1,69	- 68	-1,71	- 62	-1,56	- 67	-1,69	- 68	-1,80	- 66	-1,87	- 62	-1,57
-1,52	- 58	-1,46	- 50	-1,26	- 55	-1,38	- 58	-1,54	- 55	-1,56	- 50	-1,27
-1,12	- 41	-1,03	- 34	-0,86	- 38	-0,96	- 42	-1,11	- 40	-1,14	- 36	-0,91
-0,75	- 20	-0,50	- 14	-0,35	- 16	-0,40	- 20	-0,53	- 22	-0,62	- 16	-0,41
-0,35	0	0	13	0,33	+ 7	+0,18	5	0,13	0	0	3	0,07
0,17	10	0,40	35	0,88	33	0,83	28	0,74	22	0,62	20	0,51
0,55	45	1,13	55	1,38	54	1,36	50	1,33	40	1,14	40	1,02
0,80	68	1,71	69	1,74	73	1,84	68	1,80	55	1,56	52	1,32
1,07	85	2,14	82	2,06	85	2,11	85	2,25	70	1,99	65	1,65
1,19	97	2,44	90	2,26	96	2,42	95	2,52	80	2,27	72	1,83
1,19	106	2,67	93	2,34	102	2,57	102	2,70	86	2,44	80	2,03
1,19	110	2,77	92	2,31	105	2,64	105	2,78	88	2,50	80	2,03
1,07	105	2,64	88	2,21	100	2,52	102	2,70	88	2,50	78	1,98
0,99	100	2,52	81	2,04	94	2,37	95	2,52	84	2,39	76	1,93
0,92	95	2,39	75	1,89	88	2,21	90	2,39	80	2,27	72	1,83
0,84	88	2,21	70	1,76	80	2,01	82	2,17	80	2,27	72	1,83
0,82	79	1,99	65	1,64	74	1,86	78	2,07	72	2,04	70	1,78
0,82	76	1,91	63	1,59	70	1,76	78	2,07	75	2,13	73	1,85

	RANGEE N°6						RANGEE N°7					
	TUBE N°52 (OII)		TUBE N°56 (MII)		TUBE N°58 (LII)		TUBE N°61 (PI)		TUBE N°65 (RI)		TUBE N°67 (SI)	
	P_o = - 258 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 41,20 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 2,5°C 1 mV = 0,15 mm CE		P_o = - 219 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 35,34 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 2,5°C 1 mV = 0,15 mm CE		P_o = - 228 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 36,09 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 2°C 1 mV = 0,15 mm CE		P_o = - 221 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 38,86 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 8°C 1 mV = 0,15 mm CE		P_o = - 211 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 37,37 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 8°C 1 mV = 0,15 mm CE		P_o = - 234 mm CE $P_o - P_{réf}$ = 41,26 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 9,5°C 1 mV = 0,15 mm CE	
θ	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp
0	75	2,59	77	2,65	61	2,10	63	2,25	58	2,00	65	2,24
5	75	2,59	78	2,69	62	2,14	61	2,18	60	2,07	67	2,31
10	76	2,62	79	2,72	65	2,24	64	2,29	63	2,17	72	2,48
15	77	2,65	84	2,90	70	2,41	64	2,29	67	2,31	75	2,59
20	80	2,76	81	2,79	72	2,48	67	2,39	70	2,41	80	2,76
25	80	2,76	83	2,86	77	2,65	68	2,43	71	2,45	82	2,83
30	80	2,76	83	2,86	77	2,65	67	2,39	74	2,55	83	2,86
35	78	2,69	78	2,69	73	2,52	68	2,43	71	2,41	81	2,80
40	72	2,48	72	2,48	70	2,41	60	2,14	65	2,24	75	2,59
45	63	2,17	64	2,21	60	2,07	53	1,89	57	1,93	64	2,21
50	57	1,97	49	1,69	49	1,69	43	1,54	47	1,62	50	1,72
55	53	1,83	30	1,03	37	1,28	30	1,07	33	1,14	35	1,21
60	18	0,62	12	0,41	20	0,69	13	0,46	18	0,62	17	0,59
65	3	0,10	- 10	-0,34	5	0,17	0	0	0	0	0	0
70	- 23	-0,79	- 28	-0,97	- 20	-0,69	- 19	-0,68	- 16	-0,55	- 19	-0,66
75	- 37	-1,28	- 43	-1,48	- 33	-1,14	- 30	-1,07	- 30	-1,03	- 35	-1,21
80	- 49	-1,69	- 55	-1,90	- 44	-1,52	- 39	-1,39	- 40	-1,38	- 48	-1,66
85	- 56	-1,93	- 65	-2,24	- 50	-1,72	- 45	-1,61	- 47	-1,62	- 55	-1,90
90	- 58	-2,00	- 65	-2,24	- 54	-1,86	- 47	-1,68	- 48	-1,66	- 56	-1,93
95	- 55	-1,90	- 60	-2,07	- 50	-1,72	- 45	-1,61	- 45	-1,55	- 52	-1,79
100	- 49	-1,69	- 53	-1,83	- 45	-1,55	- 38	-1,36	- 40	-1,38	- 45	-1,55
105	- 42	-1,45	- 44	-1,52	- 38	-1,31	- 32	-1,14	- 35	-1,21	- 40	-1,38
110	- 34	-1,17	- 37	-1,28	- 31	-1,07	- 26	-0,93	- 28	-0,97	- 33	-1,14
115	- 27	-0,93	- 28	-0,97	- 25	-0,86	- 20	-0,71	- 22	-0,76	- 26	-0,90
120	- 17	-0,58	- 20	-0,69	- 18	-0,62	- 14	-0,50	- 15	-0,52	- 17	-0,59
125	- 10	-0,34	- 13	-0,45	- 12	-0,41	- 9	-0,32	- 10	-0,34	- 12	-0,41
130	- 6	-0,21	- 7	-0,24	- 8	-0,27	- 5	-0,18	- 6	-0,21	- 8	-0,28
140	- 2	-0,07	- 4	-0,14	- 4	-0,14	- 3	-0,11	- 4	-0,14	- 5	-0,17
150	0	0	- 2	-0,07	- 3	-0,10	- 1	-0,04	- 3	-0,10	- 3	-0,10
160	1	0,03	0	0	- 2	-0,07	- 1	-0,04	- 1	-0,03	- 3	-0,10
170	1	0,03	0	0	- 1	-0,03	1	0,04	- 1	-0,03	- 2	-0,07
180	5	0,17	0	0	0	0	2	0,07	0	0	0	0
-170	5	0,17	- 1	-0,03	- 1	-0,03	3	0,11	0	0	- 1	-0,03
-160	3	0,10	- 2	-0,07	- 2	-0,07	0	0	- 1	-0,03	- 1	-0,03
-150	2	0,07	- 2	-0,07	- 3	-0,10	0	0	- 1	-0,03	- 4	-0,14
-140	2	0,07	- 4	-0,14	- 4	-0,14	0	0	- 3	-0,10	- 4	-0,14
-130	- 6	-0,21	- 8	-0,28	- 6	-0,21	- 6	-0,21	- 6	-0,21	- 7	-0,24
-125	- 10	-0,34	- 13	-0,45	- 12	-0,41	- 10	-0,36	- 10	-0,34	- 12	-0,41
-120	- 18	-0,62	- 23	-0,79	- 17	-0,59	- 13	-0,46	- 15	-0,52	- 18	-0,62
-115	- 27	-0,93	- 31	-1,07	- 23	-0,79	- 20	-0,71	- 20	-0,69	- 25	-0,86
-110	- 36	-1,24	- 40	-1,38	- 31	-1,07	- 26	-0,93	- 27	-0,93	- 32	-1,10
-105	- 46	-1,59	- 51	-1,76	- 38	-1,31	- 36	-1,29	- 44	-1,52	- 40	-1,38
-100	- 54	-1,86	- 62	-2,14	- 48	-1,66	- 44	-1,57	- 40	-1,38	- 49	-1,69
- 95	- 62	-2,14	- 70	-2,41	- 54	-1,86	- 52	-1,86	- 47	-1,62	- 55	-1,90
- 90	- 65	-2,24	- 74	-2,55	- 48	-1,66	- 54	-1,93	- 50	-1,72	- 58	-2,00
- 85	- 61	-2,10	- 68	-2,34	- 53	-1,83	- 52	-1,86	- 48	-1,66	- 55	-1,90
- 80	- 54	-1,86	- 59	-2,03	- 46	-1,59	- 44	-1,57	- 42	-1,45	- 47	-1,62
- 75	- 42	-1,45	- 44	-1,52	- 35	-1,21	- 32	-1,14	- 31	-1,07	- 36	-1,24
- 70	- 23	-0,79	- 25	-0,86	- 20	-0,69	- 16	-0,57	- 18	-0,62	- 20	-0,69
- 65	- 3	-0,10	- 7	-0,24	- 2	-0,07	0	0	- 3	-0,10	- 4	-0,14
- 60	19	0,66	23	0,79	19	0,66	22	0,79	12	0,41	15	0,52
- 55	41	1,41	40	1,38	38	1,31	39	1,39	28	0,97	30	1,03
- 50	57	1,97	61	2,10	50	1,72	55	1,96	42	1,46	45	1,55
- 45	75	2,59	79	2,72	60	2,07	70	2,50	52	1,79	56	1,93
- 40	83	2,86	89	3,07	72	2,48	77	2,75	60	2,07	65	2,24
- 35	92	3,17	96	3,31	75	2,59	85	3,04	65	2,24	70	2,41
- 30	95	3,28	99	3,41	78	2,69	85	3,04	68	2,34	72	2,48
- 25	95	3,28	99	3,41	75	2,59	84	3,00	65	2,24	72	2,48
- 20	92	3,17	93	3,21	72	2,48	79	2,82	63	2,17	70	2,41
- 15	88	3,03	90	3,10	68	2,34	76	2,71	61	2,10	68	2,34
- 10	83	2,86	83	2,86	66	2,28	70	2,50	59	2,03	68	2,34
- 5	80	2,76	80	2,76	63	2,17	68	2,43	58	2,00	66	2,28
0	76	2,62	77	2,05	61	2,10	65	2,32	58	2,00	66	2,28

RANGEE Nº8						RANGEE Nº9						RANGEE Nº10					
TUBE Nº72 (JII)		TUBE Nº76 (HII)		TUBE Nº78 (GII)		TUBE Nº81 (UI)		TUBE Nº85 (WI)		TUBE Nº87 (XI)		TUBE Nº92 (EII)		TUBE Nº96 (CII)		TUBE Nº98 (BII)	
p_o = - 198 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 38,35 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 2,5ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 198 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 38,66 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 2ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 252 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 41,85 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 5ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 223 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 48,43 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 9,5ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 237 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 53,21 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 10ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 223 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 47,23 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = 9,5ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 267 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 53,21 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 4ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 243 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 49,03 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 5ºC 1 mV = 0,15 mm CE		p_o = - 221 mm CE $p_o - p_{réf}$ = 44,84 mm CE V_o = 8,3 m/s T_o = - 4ºC 1 mV = 0,15 mm CE	
Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp	Δp(mV)	Kp
49	1,69	52	1,79	28	0,97	62	2,14	65	2,24	60	2,14	23	0,82	20	0,67	15	0,52
48	1,66	53	1,83	30	1,03	62	2,14	67	2,31	61	2,18	24	0,86	21	0,70	16	0,55
49	1,69	54	1,86	35	1,21	63	2,17	70	2,41	66	2,36	25	0,89	25	0,83	20	0,69
50	1,72	56	1,93	39	1,34	67	2,31	74	2,55	70	2,50	27	0,96	28	0,93	25	0,86
51	1,76	61	2,10	42	1,45	69	2,38	80	2,76	74	2,64	29	1,04	31	1,03	30	1,03
53	1,83	63	2,17	45	1,55	74	2,55	82	2,83	76	2,71	30	1,07	32	1,07	30	1,03
54	1,86	62	2,14	45	1,55	75	2,59	82	2,83	76	2,71	30	1,07	35	1,17	32	1,10
50	1,72	59	2,03	42	1,45	72	2,48	80	2,76	74	2,64	20	0,71	31	1,03	27	0,93
47	1,62	55	1,90	35	1,21	73	2,52	73	2,52	69	2,41	20	0,71	25	0,83	22	0,76
40	1,38	48	1,66	22	0,76	60	2,07	65	2,24	61	2,18	11	0,37	16	0,53	10	0,34
32	1,10	38	1,31	7	0,24	49	1,69	53	1,83	48	1,71	- 4	-0,14	2	0,07	- 6	-0,21
19	0,66	26	0,90	- 7	-0,24	34	1,17	39	1,34	34	1,21	- 22	-0,79	- 16	-0,53	- 22	-0,76
5	0,17	11	0,38	- 28	-0,97	20	0,69	20	0,69	18	0,64	- 39	-1,39	- 35	-1,17	- 39	-1,34
- 12	-0,41	- 8	-0,28	- 49	-1,69	2	0,07	3	0,10	1	0,04	- 56	-2,00	- 54	-1,80	- 57	-1,97
- 26	-0,90	- 22	-0,76	- 65	-2,24	- 15	-0,52	- 18	-0,62	- 17	-0,61	- 77	-2,75	- 71	-2,37	- 73	-2,52
- 36	-1,24	- 35	-1,21	- 85	-2,93	- 28	-0,97	- 32	-1,10	- 33	-1,18	- 95	-3,39	- 88	-2,93	- 90	-3,10
- 45	-1,55	- 44	-1,52	-100	-3,45	- 40	-1,38	- 45	-1,55	- 42	-1,50	-110	-3,93	-105	-3,50	-105	-3,62
- 50	-1,72	- 51	-1,76	-108	-3,72	- 45	-1,55	- 52	-1,79	- 49	-1,75	-122	-4,36	-112	-3,73	-110	-3,79
- 51	-1,76	- 53	-1,83	-110	-3,79	- 48	-1,66	- 54	-1,86	- 51	-1,82	-126	-4,50	-114	-3,80	-110	-3,79
- 48	-1,66	- 50	-1,72	-106	-3,65	- 45	-1,55	- 52	-1,79	- 48	-1,71	-123	-4,39	-110	-3,67	-110	-3,79
- 45	-1,55	- 46	-1,59	-100	-3,45	- 38	-1,31	- 47	-1,62	- 42	-1,50	-118	-4,21	-106	-3,53	-105	-3,62
- 40	-1,38	- 40	-1,38	- 87	-3,00	- 32	-1,10	- 39	-1,34	- 38	-1,36	-110	-3,93	- 98	-3,27	- 96	-3,31
- 33	-1,14	- 34	-1,17	- 80	-2,76	- 28	-0,97	- 31	-1,07	- 30	-1,07	-100	-3,57	- 87	-2,90	- 88	-3,03
- 29	-1,00	- 29	-1,00	- 72	-2,48	- 21	-0,72	- 25	-0,86	- 25	-0,89	- 92	-3,29	- 78	-2,60	- 79	-2,72
- 23	-0,79	- 24	-0,83	- 63	-2,17	- 15	-0,52	- 19	-0,66	- 17	-0,61	- 80	-2,86	- 72	-2,40	- 73	-2,52
- 19	-0,66	- 18	-0,62	- 58	-2,00	- 11	-0,38	- 12	-0,41	- 11	-0,39	- 74	-2,64	- 65	-2,17	- 68	-2,34
- 17	-0,59	- 15	-0,52	- 54	-1,86	- 6	-0,21	- 8	-0,18	- 10	-0,36	- 68	-2,43	- 60	-2,00	- 60	-2,07
- 13	-0,45	- 10	-0,34	- 49	-1,69	- 2	-0,07	- 3	-0,10	- 5	-0,18	- 60	-2,14	- 55	-1,83	- 57	-1,97
- 12	-0,41	- 9	-0,31	- 46	-1,59	- 3	-0,10	- 3	-0,10	- 5	-0,18	- 59	-2,11	- 52	-1,73	- 58	-2,00
- 13	-0,45	- 11	-0,38	- 46	-1,59	- 1	-0,03	- 1	-0,03	- 4	-0,14	- 58	-2,07	- 52	-1,73	- 56	-1,93
- 11	-0,38	- 8	-0,28	- 45	-1,55	0	0	0	0	- 1	-0,04	- 57	-2,04	- 52	-1,73	- 56	-1,93
- 10	-0,34	- 7	-0,24	- 45	-1,55	0	0	0	0	- 2	-0,07	- 56	-2,00	- 52	-1,73	- 53	-1,83
- 10	-0,34	- 10	-0,34	- 44	-1,51	0	0	0	0	- 2	-0,07	- 56	-2,00	- 52	-1,73	- 55	-1,90
- 11	-0,38	- 10	-0,34	- 45	-1,55	0	0	- 1	-0,03	- 3	-0,11	- 57	-2,04	- 52	-1,73	- 55	-1,90
- 13	-0,45	- 11	-0,38	- 47	-1,62	- 1	-0,03	- 3	-0,10	- 5	-0,18	- 58	-2,07	- 53	-1,77	- 57	-1,97
- 13	-0,45	- 12	-0,41	- 48	-1,65	- 2	-0,07	- 2	-0,07	- 5	-0,18	- 60	-2,14	- 54	-1,80	- 58	-2,00
- 17	-0,59	- 14	-0,48	- 54	-1,86	- 5	-0,17	- 8	-0,28	- 10	-0,36	- 65	-2,32	- 60	-2,00	- 63	-2,17
- 20	-0,69	- 18	-0,62	- 58	-2,00	- 8	-0,28	- 12	-0,41	- 12	-0,43	- 70	-2,50	- 65	-2,17	- 68	-2,34
- 25	-0,86	- 22	-0,76	- 66	-2,28	- 15	-0,52	- 16	-0,55	- 17	-0,61	- 76	-2,71	- 70	-2,33	- 74	-2,55
- 31	-1,07	- 27	-0,93	- 72	-2,48	- 20	-0,69	- 22	-0,76	- 23	-0,82	- 87	-3,11	- 80	-2,67	- 79	-2,72
- 36	-1,24	- 32	-1,10	- 83	-2,86	- 26	-0,90	- 30	-1,03	- 28	-1,00	- 96	-3,43	- 88	-2,93	- 88	-3,03
- 43	-1,48	- 38	-1,31	- 94	-3,24	- 27	-0,93	- 38	-1,31	- 35	-1,25	-108	-3,86	- 95	-3,17	- 95	-3,28
- 49	-1,69	- 46	-1,59	-106	-3,65	- 41	-1,41	- 46	-1,59	- 45	-1,61	-118	-4,21	-108	-3,60	-108	-3,72
- 54	-1,86	- 52	-1,79	-112	-3,86	- 49	-1,69	- 53	-1,83	- 52	-1,86	-128	-4,57	-114	-3,80	-114	-3,93
- 58	-2,00	- 55	-1,90	-114	-3,93	- 52	-1,79	- 55	-1,90	- 53	-1,89	-134	-4,79	-116	-3,87	-112	-3,86
- 55	-1,90	- 53	-1,83	-110	-3,79	- 50	-1,72	- 51	-1,76	- 50	-1,79	-131	-4,68	-114	-3,80	-110	-3,79
- 48	-1,66	- 46	-1,59	-102	-3,52	- 43	-1,48	- 46	-1,59	- 43	-1,54	-124	-4,43	-102	-3,40	-104	-3,59
- 38	-1,31	- 35	-1,21	- 86	-2,97	- 32	-1,10	- 36	-1,24	- 33	-1,18	-108	-3,86	- 88	-2,93	- 92	-3,17
- 25	-0,86	- 24	-0,83	- 67	-2,31	- 18	-0,62	- 19	-0,66	- 17	-0,61	- 90	-3,21	- 72	-2,40	- 73	-2,52
- 11	-0,38	- 10	-0,34	- 50	-1,72	- 0	0	- 3	-0,10	- 3	-0,11	- 68	-2,43	- 52	-1,73	- 56	-1,93
11	0,38	11	0,38	- 30	-1,03	17	0,59	14	0,48	15	0,54	- 48	-1,71	- 35	-1,17	- 38	-1,31
25	0,86	25	0,86	- 12	-0,41	33	1,14	30	1,03	29	1,04	- 27	-0,96	- 18	-0,60	- 25	-0,86
40	1,38	39	1,34	3	0,10	49	1,69	43	1,48	42	1,50	- 7	-0,25	0	0	- 7	-0,24
48	1,66	50	1,72	20	0,69	62	2,14	55	1,90	52	1,86	13	0,46	16	0,53	5	0,17
60	2,07	57	1,97	30	1,03	70	2,41	64	2,21	61	2,18	26	0,93	23	0,77	15	0,52
63	2,17	61	2,10	36	1,24	76	2,62	70	2,41	67	2,39	35	1,25	30	1,00	19	0,66
62	2,14	64	2,21	37	1,28	76	2,62	72	2,48	67	2,39	40	1,43	32	1,07	22	0,76
63	2,17	62	2,14	36	1,24	76	2,62	71	2,45	67	2,39	40	1,43	32	1,07	22	0,76
61	2,10	61	2,10	36	1,24	75	2,59	71	2,45	67	2,39	37	1,32	30	1,00	19	0,66
58	2,00	58	2,00	32	1,10	69	2,38	66	2,28	62	2,21	33	1,18	26	0,87	17	0,59
53	1,83	55	1,90	30	1,03	66	2,28	65	2,24	60	2,14	31	1,11	23	0,77	16	0,55
50	1,72	53	1,83	30	1,03	62	2,14	64	2,21	60	2,14	26	0,93	20	0,67	15	0,52
49	1,69	52	1,79	30	1,03	61	2,10	65	2,24	60	2,14	22	0,79	19	0,63	15	0,52

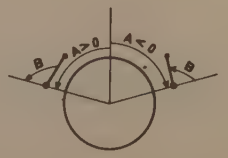
Annexe VI

Température de l'air dans le faisceau (Résultats des mesures)

TUBE N° 5 (C.I)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	793	162,5	821	164,1	840	165,2	840	165,2	850	165,7	857	166,1	861	166,3	847	165,6	849	165,7	848	165,6	846	165,5	842	165,3	785	162,0					362	141,1	254	136,7	414	143,4	567	150,5
135	833	164,8	833	164,8	841	165,2	841	165,2	848	165,6	855	166,0	860	166,3	838	165,0	848	165,6	846	165,5	844	165,4	843	165,3	805	163,1	805	163,1	595	151,9	405	143,0	324	139,5	533	148,9	535	149,0
125	834	164,8	838	165,0	843	165,3	841	165,2	849	165,7	853	165,9	859	166,3	836	164,9	848	165,6	850	165,7	847	165,6	845	165,4	828	164,5	805	163,1	800	162,9	425	143,9	359	141,0	553	149,8	475	146,1
115	835	164,9	838	165,0	842	165,3	839	165,1	849	165,7	855	166,0	857	166,1	836	164,9	847	156,6	847	165,6	849	165,7	845	165,4	834	164,8	827	164,4	805	163,1	630	153,7	395	142,5	593	151,8	525	148,5
105	836	164,9	838	165,0	841	165,2	838	165,0	848	165,6	854	166,0	858	166,2	837	165,0	850	165,7	848	165,6	850	165,7	846	165,5	837	165,0	820	164,0	804	163,1	778	161,6	424	143,8	614	152,9	598	152,1
95	839	165,1	839	165,1	840	165,2	839	165,1	845	165,4	853	166,0	858	166,2	844	165,4	850	165,7	849	165,7	850	165,7	840	165,2	823	164,2	818	163,9	803	163,0	680	156,3	442	144,6	624	153,4	664	155,5
85	834	164,8	840	165,2	838	165,0	841	165,2	845	165,4	852	165,9	858	166,2	845	165,4	852	165,9	849	165,7	849	165,7	835	164,9	817	163,8	814	163,7	802	163,0	651	154,8	466	145,7	627	153,5	710	157,9
75			835	164,9	838	165,0	841	165,2	845	165,4	853	165,9	860	166,3	848	165,6					849	165,7	832	164,7	815	163,7	812	163,5	800	162,9	612	152,8	501	147,4					738	159,4
65			833	164,8	839	165,1	843	165,3	847	165,6	856	166,1	858	166,2							845	165,4	832	164,7	835	163,7	810	163,4	792	162,4	583	151,3								
55			833	164,8	838	165,0	844	165,4	846	165,6	857	166,1	859	166,3							846	165,5	835	164,9	815	163,7	805	163,1	745	159,8	572	150,8								
45			835	164,9	839	165,1	846	165,5	747	165,6	859	166,3									848	165,6	834	164,8	806	163,2	800	162,9	653	159,4								
35			836	164,9	837	165,0	846	165,5	850	165,7											845	165,6	825	164,3	795	162,6	797	162,7	547	149,6								
25			838	165,0	840	165,2	848	165,6	853	165,9											845	165,4	805	163,1	728	158,9	652	154,8										
15			839	165,1	841	165,2	850	165,7													842	165,3	718	158,3	654	154,9	518	148,2										
5					840	165,2																			621	153,2												

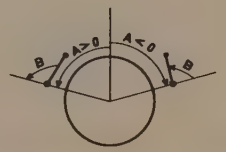
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	741	159,6	821	164,1	844	165,4	841	165,2	843	165,3	852	165,9	842	165,3	842	165,3	837	165,0	830	164,6	829	164,9	826	164,3	682	156,4			286	138,0	291	138,2	296	138,4	403	142,9	534	148,9
135	852	165,9	854	156,0	853	165,9	854	166,0	853	165,9	848	165,6	852	165,9	852	165,9	840	165,2	851	165,8	846	165,5	845	165,4	822	163,0	811	163,5			413	143,3	411	143,2	552	149,8	555	149,9
125	856	166,1	856	166,1	860	166,3	859	166,3	857	166,1	856	166,1	854	165,6	854	165,6	845	165,4	852	165,9	858	165,6	848	165,6	833	164,8	830	164,6	798	162,7	410	143,2	455	145,2	564	150,4	512	147,9
115	859	166,3	855	166,0	858	166,2	858	166,2	855	166,0	855	166,0	855	166,0	855	166,0	854	165,6	852	165,9	857	165,6	850	165,7	837	165,0	832	164,7	810	163,4	652	154,8	476	146,2	592	151,8	536	149,0
105	859	166,3	859	166,3	858	166,2	859	166,3	853	165,9	857	166,1	855	166,0	855	166,0	858	166,2	852	165,9	858	166,2	850	165,7	840	165,4	832	164,7	814	163,7	735	159,2	500	147,3	619	153,1	564	150,4
95	856	166,1	858	166,2	857	166,1	858	166,2	853	165,9	857	166,1	857	166,1	856	166,1	856	166,1	853	165,9	858	166,2	849	165,7	831	164,6	828	165,0	816	163,8	728	158,9	506	147,6	635	154,0	622	153,2
85	856	166,1	857	166,1	856	166,1	857	166,1	854	166,0	856	166,1	855	166,0	855	166,0	857	166,1	855	166,0	859	166,3	845	165,4	829	164,5	830	164,6	810	163,4	697	157,2	517	148,1	632	153,8	670	155,8
75			858	166,2	855	166,0	857	166,1	852	165,9	857	166,1	855	166,0	857	166,1					855	166,0	841	165,2	825	164,3	823	164,2	808	163,3	655	155,0	523	148,4					688	156,7
65			858	166,2	856	166,1	853	165,9	851	165,8	856	166,1	856	166,1							854	166,0	839	165,1	821	164,1	822	164,1	802	163,0	620	153,2								
55			855	166,0	855	166,0	856	166,1	854	166,0	856	166,1	858	166,2							853	165,9	836	164,9	826	164,3	814	163,7	764	160,8	595	151,9								
45			858	166,2	853	165,9	854	166,0	856	166,1	855	166,0									853	165,9	830	164,6	809	163,4	808	163,3	690	156,8								
35			858	166,2	855	166,0	858	166,2	860	166,3	855	166,0									853	165,9	829	164,5	798	162,7	711	157,9	620	153,2								
25			856	166,1	857	166,1	855	166,0	860	166,3	856	166,1									851	165,8	776	161,5	648	154,6	665	155,5										
15			857	166,1	855	166,0	855	166,0	859	166,3											829	164,5	711	157,9	608	152,6												
5					856	166,1																			603	152,3												



TUBE N° 7 (D.I)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	822	164,1	839	165,1	851	165,8	853	165,9	850	165,7	858	166,2	853	165,9	854	166,0	852	165,9	849	165,7	847	165,6	847	165,6	806	165,2					416	143,5			389	142,3	569	150,6
135	855	166,0	846	165,5	854	166,0	852	165,9	852	165,9	855	166,0	853	165,9	852	165,9	850	165,7	849	165,7	846	165,5	844	165,4	824	164,2	808	163,3			457	145,3			503	147,4	495	147,1
125	857	166,1	847	165,6	853	165,9	850	165,7	853	165,9	856	166,1	852	165,9	852	165,9	853	165,9	852	165,9	847	165,6	846	165,5	830	164,6	818	163,9	814	163,7			446	144,8	546	149,5	489	146,8
115	854	166,0	847	165,6	854	166,0	851	165,8	850	165,7	854	166,0	854	166,0	853	165,9	853	165,9	851	165,8	850	165,7	846	165,5	832	164,7	827	164,4	814	163,7	703	157,5	478	146,3	574	150,9	531	148,8
105	855	166,0	848	165,6	855	166,0	854	166,0	851	165,8	853	165,9	853	165,9	852	165,9	852	165,9	851	165,8	848	165,6	850	165,7	838	165,0	822	164,1	809	163,4	748	160,0	495	147,1	591	151,7	592	151,8
95	853	165,9	847	165,6	856	166,1	851	165,8	852	165,9	855	166,0	852	165,9	853	165,9	852	165,9	853	165,9	849	165,7	848	165,6	824	164,2	821	164,1	808	163,3	735	159,2	512	147,9	615	152,9	667	155,7
85	852	165,9	844	165,4	855	166,0	850	165,7	852	165,9	852	165,9	853	165,9	853	165,9	853	165,9	851	165,8	850	165,7	843	165,3	818	163,9	818	163,9	807	163,3	707	157,7	522	148,4	621	153,2	708	157,8
75			846	165,5	853	165,9	848	165,6	853	165,9	852	165,9	851	165,8	853	165,9					846	165,5	835	164,9	820	164,0	817	163,8	807	163,3	673	155,9	540	149,2					731	159,0
65			846	165,5	854	166,0	847	165,6	852	165,9	852	165,9	853	165,9							845	165,4	836	164,9	823	164,2	816	163,6	802	163,0	640	154,2								
55			846	165,5	853	165,9	844	165,4	853	165,9	853	165,9	851	165,8							847	165,6	835	164,9	818	163,9	802	163,0	773	161,3	617	153,0								
45			847	165,6	852	165,9	849	165,7	853	165,9	854	166,0									844	165,4	836	164,9	810	163,4	759	160,6	705	157,6								
35			848	165,6	855	166,0	848	165,6	853	165,9											844	165,4	831	164,6	804	163,1	672	155,9	620	153,2								
25			848	165,6	855	166,0	847	165,6	853	165,9											844	165,4	811	163,5	740	159,7	594	151,9										
15			848	165,6	855	166,0	847	165,6													830	164,6	735	159,2	677	156,1												
5					855	166,0																			643	154,4												

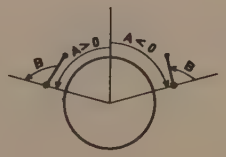
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	774	161,4	777	161,6	831	164,6	834	164,8	827	164,4	832	164,7	833	164,8	827	164,4	826	164,3	838	165,0	830	164,6	819	163,9	630	153,7					305	138,7			404	142,9	515	148,1
135	832	164,7	833	164,8	839	165,1	837	165,0	834	164,8	835	164,9	841	165,2	827	164,4	834	164,8	844	165,4	850	165,7	839	165,1	821	164,1	811	163,5			436	144,4			537	149,1	548	149,6
125	837	165,0	836	164,9	842	165,3	843	165,3	838	165,0	839	165,1	846	165,5	841	165,2	845	165,4	851	165,8	851	165,8	842	165,3	834	164,8	826	164,3	801	162,9	443	144,7			554	149,9	502	147,4
115	839	165,1	837	165,0	846	165,5	842	165,3	838	165,0	839	165,1	845	165,4	840	165,2	846	165,5	853	165,9	851	165,8	842	165,3	835	164,9	833	164,8	808	163,3	634	153,9			602	152,3	512	147,9
105	838	165,0	840	165,2	846	165,5	842	165,3	838	165,0	842	165,3	846	165,5	839	165,1	845	165,4	853	165,9	853	165,9	843	165,3	828	164,5	832	164,7	818	163,9	710	157,9	489	146,8	627	153,5	555	150,0
95	837	165,0	842	165,3	843	165,3	840	165,2	837	165,0	843	165,3	848	165,6	842	165,3	846	165,5	855	166,0	852	165,9	843	165,3	820	164,0	830	164,6	815	163,7	719	158,4	504	147,5	637	154,1	622	153,3
85	838	165,0	837	165,0	842	165,3	838	165,0	839	165,1	842	165,3	844	165,4	843	165,3	847	165,6	857	166,1	852	165,9	841	165,2	817	163,8	829	164,5	812	163,5	692	156,9	504	147,5	620	153,2	668	155,7
75			838	165,0	841	165,2	837	165,0	838	165,0	844	165,4	843	165,3	843	165,3					851	165,8	834	164,8	815	163,7	822	164,1	808	163,3	672	155,9	535	149,0			690	156,9		
65			837	165,0	845	165,4	836	164,9	837	165,0	843	165,3	842	165,3							847	165,6	832	164,7	811	163,5	821	164,1	803	163,0	638	154,1								
55			836	164,9	844	165,4	837	165,0	838	165,0	843	165,3	843	165,3							847	165,6	831	164,6	805	163,1	814	164,2	768	161,1	613	152,8								
45			839	165,1	844	165,4	839	165,1	839	165,1	844	165,4									845	154,4	824	164,2	798	162,7	805	163,1	703	157,5								
35			838	164,9	843	165,3	840	165,2	840	165,2	846	165,5									844	165,4	826	164,3	692	156,9	736	159,3	625	153,4								
25			841	165,2	846	165,5	842	165,3	838	165,0											842	165,3	776	161,5	662	155,3	685	156,6										
15			840	165,2	846	165,5	840	165,2													819	163,9	715	158,2														
5					845	165,4																																



TUBE N° 16 (W.II)

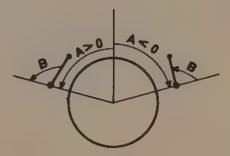
B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	526	152,0	611	156,6	687	161,0	681	160,6	698	161,7	729	163,5	736	164,0	735	163,9	718	162,9	686	160,9	665	159,6	652	158,9	608	156,4							419	147,0	460	148,8	463	148,9
135	621	157,1	646	158,6	672	160,1	693	161,3	702	161,9	753	165,0	777	166,5	790	167,4	792	166,8	781	166,8	773	166,2	757	165,2	722	163,1	684	161,4	573	154,5	472	149,4	510	151,2	528	152,0	555	153,5
125	626	157,4	636	158,0	656	159,1	662	159,5	719	162,9	801	168,1	819	169,2	824	169,6	824	169,6	811	168,7	801	168,1	798	167,9	784	167,0	745	164,5	678	160,5	557	153,6	542	152,9	558	153,7	602	156,1
115	613	156,7	610	156,5	631	157,7	674	160,2	786	166,1	823	169,5	819	169,2	824	169,6	824	169,6	812	168,8	811	168,7	807	168,5	802	168,1	778	166,6	715	162,6	609	156,4	570	154,3	592	155,5	635	157,9
105	595	155,7	592	155,5	635	157,9	763	165,6	818	169,2	826	169,8	823	169,5	825	169,6	824	169,6	812	168,8	812	168,8	811	168,7	807	168,5	792	167,5	737	164,0	634	157,9	586	155,2	612	156,6	663	159,5
95	587	155,2	578	154,8	669	159,9	817	169,1	819	169,2	822	169,5	821	169,4	827	169,8	827	169,8	813	168,9	812	168,8	810	168,7	805	168,3	789	167,3	737	164,0	648	158,7	600	156,0	632	157,8	672	160,1
85	567	154,2	570	154,3	816	169,0	816	169,0	819	169,2	822	169,5	822	169,5	827	169,8	812	168,8	802	168,1	811	168,7	808	168,5	805	168,3	792	167,5	732	163,7	651	158,8	610	156,5	650	158,8	693	161,3
75			681	160,6	820	169,3	814	168,9	757	165,2	827	169,8	823	169,5	802	168,1					804	168,3	804	168,3	804	168,3	785	167,0	715	162,6	644	158,4	615	156,8					702	161,9
65			821	169,4	813	168,9	815	169,0	722	163,1	818	169,2	787	167,2							804	168,3	802	168,1	803	168,2	779	166,6	696	161,5	643	158,4							
55			822	169,5	815	169,0	814	168,9	728	163,5	774	166,3	725	163,3							797	167,8	802	168,1	802	168,1	759	165,4	682	160,7	603	156,1							
45			822	169,5	813	168,9	815	169,0			742	164,3									800	168,0	803	168,2	798	167,9	732	163,7	663	159,5									
35			821	169,4	818	169,2	770	166,1													802	168,1	800	168,0	778	166,6	694	161,4	602	156,1									
25			822	169,5	813	168,9	698	161,7													801	168,1	779	166,6	722	163,1	648	158,7											
15			825	169,7	743	164,4	682	160,7													790	167,4	718	162,9	673	160,1	564	154,0											
5					685	160,8																			647	158,6													

B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	571	154,4	584	155,1	664	159,6	680	160,6	689	161,1	705	162,0	716	162,7	738	164,1	719	162,9	703	161,9	688	161,0	674	160,2	635	157,9	560	153,8	408	146,6			427	147,3	460	148,8	462	148,9
135	603	156,1	588	155,3	647	158,6	662	159,5	676	160,3	718	162,9	782	166,8	781	166,7	780	166,7	778	166,6	769	166,0	743	164,4	713	162,5	672	160,1	614	156,7	528	152,1	515	151,4	555	153,5	568	154,2
125	593	155,6	580	154,9	626	157,4	645	158,5	687	161,0	782	166,8	825	169,7	816	169,1	815	169,0	813	168,8	806	168,5	796	167,7	764	165,7	724	163,2	676	160,3	598	155,9	561	153,9	594	155,6	607	156,3
115	582	155,0	558	153,7	606	156,3	638	158,1	674	160,2	824	169,6	825	169,7	821	169,4	815	169,0	822	169,5	818	169,2	810	168,7	796	167,8	750	164,8	706	162,1	632	157,8	596	155,8	629	157,6	644	158,5
105	570	154,3	546	153,1	596	155,8	735	163,9	821	169,4	824	169,6	827	169,8	821	169,4	822	169,5	824	169,6	825	169,7	816	169,0	802	168,1	764	165,7	720	163,0	646	158,6	614	156,7	651	158,9	673	160,1
95	556	153,6	526	152,0	602	156,1	826	169,8	817	169,1	821	169,4	825	169,7	825	169,7	826	169,8	828	169,9	823	169,5	816	169,0	803	168,2	770	166,1	725	163,3	652	158,9	628	157,5	667	159,8	702	161,9
85	539	152,7	523	151,9	815	169,0	828	169,9	817	169,1	823	169,5	824	169,6	820	169,3	826	169,8	823	169,5	818	169,2	813	168,9	805	168,3	771	166,1	718	162,9	658	159,3	632	157,8	685	160,8	719	162,9
75			583	155,0	828	169,9	828	169,9	820	169,3	824	169,6	825	169,7	816	169,1					818	169,2	812	168,8	804	168,3	763	165,6	712	162,5	652	158,9	632	157,8					728	163,5
65			818	169,2	828	169,9	831	170,1	822	169,5	824	169,6	818	169,2							813	168,9	812	168,8	803	168,2	746	164,6	697	161,6	642	158,3							
55			820	169,3	827	169,8	829	169,9	818	169,2	814	168,9	788	167,2							810	168,7	809	168,6	796	167,7	735	164,3	687	161,0	575	154,6							
45			825	169,7	829	169,9	827	169,8	804	168,3	793	167,5									810	168,7	807	168,5	786	167,1	710	162,4	662	159,5									
35			825	169,7	831	170,1	825	169,7	770	166,1	770	166,1									813	168,9	804	168,3	758	165,3	681	160,6	592	155,5									
25			825	169,7	826	169,8	772	166,2	768	166,0											802	168,1	774	166,3	700	161,8	657	159,2											
15			828	169,9	820	169,3	746	164,6	736	164,0											772	166,2	707	162,2	658	159,3											
5					764	165,7																																



B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	573	154,5	659	159,3	725	163,3	712	162,5	742	164,3	750	164,8	766	165,8	754	165,1	736	164,0	733	163,8	726	163,4	708	162,2	664	159,6							458	148,7	442	148,0	450	148,3
135	640	158,2	674	160,2	701	161,8	733	163,7	742	164,3	785	167,0	798	167,9	809	168,6	804	168,3	810	168,7	804	168,3	786	167,1	766	166,0	723	163,2	571	154,4	511	151,2	522	151,8	532	152,3	552	153,4
125	635	157,9	652	158,9	669	159,9	709	162,3	765	165,7	823	169,5	829	169,9	825	169,7	819	169,3	822	169,5	817	169,1	813	168,8	799	167,9	771	166,1	709	162,3	588	155,3	556	153,6	570	154,3	599	155,4
115	622	157,2	636	158,0	655	159,1	731	163,6	824	169,6	828	169,9	830	170,0	825	169,7	822	169,5	826	169,8	823	169,5	818	169,2	812	168,8	801	163,1	749	164,7	643	158,4	579	154,8	589	155,3	629	157,6
105	614	156,7	627	157,5	654	159,0	818	169,2	830	170,0	828	169,9	830	170,0	822	169,5	825	169,7	825	169,7	825	169,7	819	169,2	817	167,8	804	168,3	760	165,4	666	159,7	598	155,9	612	156,6	656	159,1
95	607	156,3	606	156,3	738	164,1	834	170,3	830	170,0	830	170,0	830	170,0	825	169,7	822	169,5	818	169,2	815	169,0	812	168,8	812	168,8	805	168,3	764	165,7	673	160,1	612	156,6	630	157,6	674	162,0
85	598	155,9	592	155,5	834	170,3	837	170,5	830	170,0	830	170,0	830	170,0	823	169,5	796	167,8	793	167,5	800	168,0	802	168,1	809	168,6	804	168,3	756	165,2	670	160,0	623	157,2	643	158,4	692	161,3
75			793	161,4	834	170,3	832	170,2	830	170,0	830	170,0	818	169,2	783	166,9					790	167,4	798	167,9	804	168,3	797	167,8	742	164,3	671	160,0	635	157,9					699	161,7
65			824	169,6	832	170,2	832	170,2	828	169,9	814	168,9	767	165,9							783	166,9	794	167,6	804	168,3	790	167,4	727	163,4	666	159,7								
55			828	169,9	836	170,4	833	170,2	812	168,8	752	165,0	568	153,7							782	166,8	794	167,6	802	168,1	774	166,3	712	162,5	645	158,5								
45			827	169,8	833	170,2	829	169,3	739	164,1	721	163,0									787	167,2	792	167,5	799	167,9	756	165,2	690	161,2								
35			827	169,8	837	170,5	750	164,8	699	161,7											791	167,4	795	167,7	783	166,9	718	162,9	625	157,4								
25			827	169,8	817	169,1	677	160,4	708	162,2											797	167,8	777	166,5	745	164,5	681	160,6										
15			830	170,0	721	163,0	665	159,7													791	167,4	738	164,1	704	162,0	587	155,2										
5					671	160,0																			677	160,0												

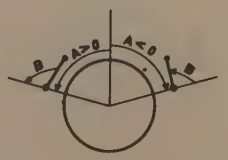
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	561	153,8	593	155,5	677	160,4	648	158,7	659	159,3	669	159,9	670	160,4	687	161,0	699	167,1	685	160,8	671	160,0	649	158,7	618	157,0	526	152,0	420	147,7	418	147,0	446	148,2	522	151,8	514	151,4
135	574	154,5	571	154,4	588	155,3	627	157,5	652	158,9	664	159,6	711	162,4	744	164,4	757	165,2	766	165,8	750	164,8	732	163,7	706	162,1	675	160,3	606	156,3	545	153,0	551	153,3	597	155,8	597	155,8
125	570	154,3	559	153,8	583	155,0	613	156,7	641	158,3	748	164,7	789	167,3	804	168,3	813	168,8	810	168,7	805	168,3	787	167,2	758	165,3	726	163,3	668	159,9	603	156,1	594	155,6	616	156,8	630	157,6
115	566	154,1	567	154,1	572	154,4	605	156,2	739	164,1	824	169,6	827	169,8	832	170,2	827	169,8	826	169,7	824	169,6	814	168,9	795	167,7	760	165,4	699	161,7	638	158,1	622	157,2	644	158,5	664	159,6
105	557	153,6	566	154,1	604	156,2	670	160,0	832	170,2	829	169,9	834	170,3	830	170,0	837	170,5	827	169,8	826	169,8	820	169,3	805	168,3	771	166,1	721	163,0	653	159,0	638	158,1	664	159,6	695	161,5
95	540	152,8	550	153,3	622	157,2	822	169,5	830	170,0	831	170,1	830	170,0	832	170,2	836	170,4	830	170,0	828	169,9	821	169,4	809	168,6	784	166,9	725	163,3	661	159,5	653	159,0	685	160,8	716	162,7
85	528	152,1	514	151,4	797	167,8	834	170,3	832	170,2	829	169,9	833	170,2	833	170,2	834	170,3	828	169,8	827	169,8	822	169,5	811	168,7	782	166,8	721	163,0	665	159,7	658	159,3	701	161,8	737	164,0
75			508	151,1	836	170,4	836	170,4	828	169,9	830	170,0	832	170,2	827	169,8	821	169,4			825	169,7	822	169,5	808	168,5	777	166,5	716	162,0	663	159,5	635	159,1					745	164,5
65			832	170,2	831	170,1	837	170,5	830	170,0	830	170,0	824	169,6							820	169,3	814	168,9	804	168,3	766	165,8	700	161,8	662	159,5								
55			828	169,9	833	170,2	835	170,3	831	170,1	817	169,1	790	167,4							817	169,1	815	169,0	804	168,3	743	164,3	692	161,3	592	155,5								
45			830	170,0	833	170,2	838	170,6	810	168,7	794	167,6									818	169,2	810	168,7	782	166,8	726	163,3	672	161,1								
35			832	170,2	835	170,4	829	169,9	778	166,6	764	167,5									819	169,2	805	168,3	761	165,5	694	161,4	554	153,5								
25			830	170,0	839	170,6	788	167,2	772	166,2											808	168,5	764	165,7	707	162,1	662	159,5										
15			834	170,3	822	169,5	761	165,5	732	163,7													705	162,0	676	160,3												
5					774	166,3																																



TUBE N° 25 (H.I)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	710	157,9	714	158,1	723	158,6	725	158,7	723	158,6	727	158,8	734	159,2	742	159,6	731	159,0	724	158,6	725	158,7	712	158,0	695	157,1	636	154,0	538	149,1	440	144,5	470	145,9	520	148,3	540	149,2
135	723	158,6	730	159,0	739	159,5	734	159,2	730	159,0	745	159,8	756	160,4	762	160,7	763	160,8	760	160,6	758	160,5	741	159,6	737	159,4	708	157,8	673	155,9	630	153,7	590	151,7	596	152,0	621	153,2
125	727	158,8	732	159,1	728	158,9	726	158,8	739	159,5	758	160,5	782	161,8	793	162,5	791	162,4	795	162,6	785	162,0	772	161,0	765	160,9	740	159,5	710	157,9	673	155,9	654	154,9	648	154,6	660	155,2
115	721	158,5	724	158,6	711	157,9	721	158,5	752	160,2	788	162,2	808	163,3	817	163,8	817	163,8	812	163,5	807	163,3	792	162,4	783	161,9	761	160,7	730	159,0	690	156,8	675	156,0	675	156,0	689	156,8
105	711	157,9	700	157,4	702	157,5	740	159,5	788	162,2	817	163,8	828	164,5	830	164,6	822	164,1	814	163,7	812	163,5	804	163,1	790	162,3	779	161,7	735	159,2	705	157,6	692	156,9	699	157,3	707	157,7
95	693	157,0	674	156,0	714	158,1	774	161,4	815	163,7	829	164,5	830	164,6	823	164,2	808	163,3	800	162,9	798	162,7	798	162,7	791	162,4	770	161,2	740	159,5	709	157,8	701	157,4	704	157,6	715	158,2
85	658	155,1	656	155,0	749	160,0	809	163,4	828	164,5	833	164,8	823	164,2	804	163,1	782	161,8	778	161,6	783	161,9	793	162,5	783	161,9	770	161,2	734	159,2	708	157,8	703	157,7	707	157,7	717	158,3
75			688	156,7	798	162,7	830	164,6	831	164,6	822	164,1	802	163,0	778	161,6					773	161,3	784	162,0	784	162,0	764	168,8	732	159,1	709	157,8	702	157,5					712	158,0
65			750	160,1	830	164,0	834	164,8	824	164,2	799	162,8	780	161,7							764	160,8	778	161,6	778	161,6	757	160,5	723	158,6	706	157,7								
55			803	163,0	840	165,2	834	164,8	802	163,0	777	161,6	760	160,6							764	160,8	778	161,6	775	161,5	747	159,9	717	158,3	689	156,8								
45			834	164,8	838	165,0	820	164,0	778	161,6	760	160,6									767	161,0	776	161,5	764	160,8	735	159,2	712	158,0								
35			843	165,3	836	164,9	790	162,3	758	160,5											768	161,1	776	161,5	755	160,3	720	158,4	667	155,6								
25			842	165,3	823	164,2	764	160,8	750	160,1											769	161,1	774	161,4	741	159,6	701	157,4										
15			839	165,1	797	162,7	751	160,1													768	161,1	760	160,6	719	158,4	677	156,1										
5					775	161,5																			700	157,4												

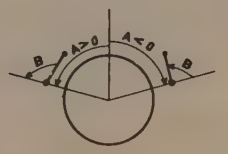
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	668	155,7	670	155,8	683	156,5	693	157,0	710	157,9	713	158,1	718	158,3	708	157,8	704	157,6	697	157,2	687	156,7	679	156,2	645	154,5	585	151,4	432	144,2	387	142,2	430	144,1	494	147,0	509	147,7
135	700	157,4	712	158,0	778	158,3	715	157,6	731	159,0	738	159,4	739	159,5	744	159,7	738	159,4	737	159,4	738	159,4	729	158,9	715	158,2	700	157,4	762	155,3	604	152,4	560	150,2	586	151,5	597	152,0
125	708	157,8	721	158,5	724	158,6	727	158,8	738	159,4	751	160,1	764	160,8	768	161,1	771	161,2	772	161,3	767	161,0	758	160,5	744	159,7	730	159,0	698	157,3	666	155,6	643	154,4	637	154,1	650	155,0
115	706	157,8	720	158,4	715	157,6	722	158,5	745	159,8	770	161,2	785	162,0	792	162,4	791	162,4	787	162,1	788	162,4	780	161,7	757	160,5	745	159,8	718	158,3	693	157,0	680	156,3	670	155,8	689	156,8
105	699	157,3	710	157,9	703	157,5	726	158,8	765	160,9	792	162,4	811	163,5	811	163,5	803	163,0	798	162,7	788	162,4	785	162,0	770	161,2	754	160,3	728	158,9	708	157,8	694	157,0	693	157,0	706	157,7
95	687	156,7	684	156,5	700	157,4	747	159,9	793	162,5	808	163,3	815	163,7	810	163,4	798	162,7	789	162,2	790	162,3	783	161,9	772	161,3	755	160,3	731	159,0	710	157,9	703	157,5	713	158,1	719	158,4
85	658	155,1	676	156,1	717	158,3	777	161,6	815	163,7	827	164,4	812	163,5	793	162,5	780	161,7	772	161,3	777	161,6	773	161,3	761	160,7	755	160,3	729	158,9	718	158,3	706	157,7	705	157,6	721	158,5
75			678	156,2	750	160,1	802	163,0	830	164,6	818	163,9	794	162,5	777	161,6					764	160,8	767	161,0	764	160,8	748	160,0	730	159,0	714	158,1	703	157,5					714	158,1
65			710	157,9	780	161,7	822	164,1	824	164,2	797	162,7	769	161,1							755	160,3	759	160,6	758	160,5	747	159,9	720	158,4	713	158,1								
55			757	160,7	807	163,3	829	164,5	808	163,3	773	161,3	753	160,2							749	160,0	755	160,3	754	160,3	743	159,7	718	158,3	701	157,4								
45			792	162,4	824	164,2	817	163,8	779	161,7	755	160,3									749	160,0	753	160,2	752	160,2	732	159,1	713	158,1								
35			823	164,2	831	164,6	791	162,4	760	160,6	746	159,9									752	160,2	754	160,3	747	159,9	721	158,5	694	157,0								
25			829	164,5	817	163,8	765	160,9	753	160,2											750	160,1	753	160,2	736	159,3	704	157,6										
15			835	164,9	786	162,1	752	160,2	738	159,4											753	160,2	741	159,6	716	158,2												
5					765	160,9																																



TUBE N° 27 (I.I)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	730	159,0	726	158,8	732	159,1	742	159,6	746	159,9	749	160,0	759	160,6	758	160,5	738	159,4	739	159,5	739	159,5	737	159,4	718	158,3	656	155,0	538	149,1	469	145,9	484	146,6	522	148,4	563	150,3
135	742	159,6	740	159,5	751	160,1	759	160,6	752	160,2	769	161,1	774	161,4	778	161,6	765	160,9	766	161,0	773	161,3	764	160,8	757	160,5	729	158,9	690	156,8	644	154,4	618	153,1	618	153,1	645	154,5
125	739	159,5	745	159,8	746	159,9	749	160,0	762	160,7	782	161,8	799	162,8	794	162,5	786	162,1	796	162,6	796	162,6	789	162,2	775	161,5	755	160,3	726	158,8	708	157,8	668	155,7	662	155,3	685	156,6
115	735	159,2	735	159,2	732	159,1	749	160,0	782	161,8	809	163,4	815	163,7	810	163,4	807	163,3	800	163,5	808	163,3	798	162,7	789	162,2	768	161,1	745	159,8	720	158,4	692	156,9	696	157,1	715	158,2
105	727	158,8	712	158,0	725	158,7	768	161,1	805	163,1	829	164,5	830	164,6	818	163,9	806	163,2	805	163,1	801	162,9	804	163,1	795	162,6	773	161,3	746	159,9	725	158,7	712	158,0	718	158,3	728	158,9
95	703	157,5	690	156,8	741	159,6	798	162,7	832	164,7	842	165,3	832	164,7	804	163,1	785	162,0	792	162,4	793	162,5	799	162,8	792	162,4	775	161,5	750	160,1	722	158,5	718	158,3	725	158,7	735	159,2
85	662	155,3	689	156,8	760	161,1	820	164,0	837	165,0	835	164,9	814	163,7	782	161,8	764	160,8	772	161,3	782	161,8	792	162,4	785	162,0	772	161,3	746	159,9	726	158,8	720	158,4	722	158,5	732	159,1
75			714	158,1	813	163,6	839	165,1	836	164,9	818	163,9	795	162,6	757	160,5					772	161,3	779	161,7	780	161,7	768	161,1	747	159,9	720	158,4	714	158,1					724	158,6
65			773	161,3	835	164,9	844	165,4	820	164,0	792	162,4	767	161,0							765	160,9	774	161,4	777	161,6	766	161,0	739	159,5	710	157,9								
55			809	163,4	841	165,2	831	164,6	798	162,7	772	161,3	750	160,1							759	160,6	778	161,6	774	161,4	758	160,5	732	159,1								
45			835	164,9	846	165,5	812	163,5	774	161,4	763	160,8									764	160,8	772	161,3	765	160,9	748	160,0	729	158,9								
35			842	165,3	832	164,7	781	161,8	764	160,8											765	160,9	776	161,5	763	160,8	734	159,2	692	156,9								
25			843	165,3	805	163,1	764	160,8	759	160,6											773	161,3	776	161,5	750	160,1	726	158,8										
15			830	164,6	783	161,9	755	160,3													769	161,1	765	160,9	730	159,0	702	157,5										
5					773	161,3																			718	158,3												

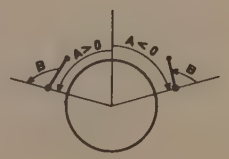
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	672	155,9	677	156,1	694	157,0	704	157,6	712	158,0	713	158,1	721	158,5	716	158,2	712	158,0	709	157,8	694	157,0	672	155,9	655	155,0	578	151,1	446	144,8	359	141,0	423	143,8	489	146,8	512	147,9
135	710	157,9	716	158,2	731	159,0	735	159,2	730	159,0	741	159,6	740	159,5	741	159,6	749	160,0	743	159,7	735	159,2	725	158,7	736	159,3	704	157,6	656	155,0	602	152,3	581	151,2	583	151,3	604	152,4
125	720	158,4	730	159,0	739	159,5	730	159,0	735	159,2	754	160,3	765	160,9	772	161,3	778	161,6	780	161,7	771	161,2	760	160,6	765	160,9	738	159,4	706	157,7	671	155,8	652	154,8	651	154,8	664	155,5
115	718	158,3	731	159,0	725	158,7	731	159,0	748	160,0	773	161,3	788	162,2	798	162,7	803	163,0	798	162,7	795	162,3	780	161,7	784	162,0	756	160,4	731	159,0	696	157,1	678	156,2	682	156,4	704	157,6
105	707	157,7	713	158,1	713	157,5	730	159,0	765	160,9	801	162,9	817	163,8	822	164,1	821	164,1	815	163,1	806	163,2	794	162,5	788	162,2	755	160,3	739	159,5	709	157,8	702	157,5	703	157,5	719	158,4
95	690	156,8	689	156,8	707	157,7	749	160,0	798	162,7	827	164,4	829	164,4	827	164,4	812	163,5	803	163,0	797	162,7	792	162,4	789	162,2	771	161,2	748	160,0	718	158,3	704	157,6	714	158,1	728	158,9
85	665	155,5	660	155,2	721	158,5	787	162,1	821	164,1	836	164,9	823	164,2	807	163,3	791	162,4	789	162,2	783	161,9	781	161,8	788	162,2	773	161,3	742	159,6	717	158,2	710	157,9	712	158,0	729	158,9
75			658	155,1	752	160,2	818	163,9	830	164,6	827	164,4	805	163,1	780	161,7					771	161,2	778	161,6	782	161,8	765	160,9	734	159,2	719	158,4	704	157,6					725	158,7
65			704	157,6	795	162,6	830	164,6	826	164,3	807	163,3	780	161,7							764	160,8	774	161,4	778	161,7	764	160,8	730	159,0	716	158,2								
55			758	160,5	830	164,6	838	165,0	811	163,5	782	161,8	752	160,3							754	160,3	776	161,5	774	161,4	752	160,2	724	158,6	707	157,7								
45			803	163,0	835	164,9	823	164,2	785	162,0	764	160,8									756	160,4	773	161,3	771	161,2	743	159,7	721	158,5								
35			823	164,2	832	164,7	802	163,0	761	160,7	751	160,1									754	160,3	772	161,3	764	160,8	732	159,1	703	157,5								
25			835	164,9	824	164,2	773	161,3	753	160,2											754	160,3	769	161,1	751	160,1	714	158,1										
15			833	164,8	803	163,0	753	160,2	742	159,6											757	160,5	760	160,6	732	159,1												
5					777	161,6																																



TUBE N° 36 (R.II)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	650	158,8	660	159,4	659	159,3	660	159,4	678	160,5	671	160,0	673	160,1	674	160,2	672	160,1	663	159,5	662	159,0	639	158,1	585	155,1	452	148,4					444	148,1	484	149,9	492	150,3
135	691	161,2	697	161,6	699	161,7	692	161,3	704	162,0	700	161,8	702	161,9	709	162,3	710	162,4	701	161,8	702	161,9	700	161,8	679	160,5	650	158,8	608	156,4	554	153,5	545	153,0	561	153,8	578	154,8
125	702	161,9	710	162,4	701	161,8	698	161,6	713	162,5	713	162,5	716	162,7	725	163,3	724	163,2	726	163,4	726	163,4	712	162,5	702	161,9	682	160,7	655	159,1	616	156,9	597	155,8	602	156,1	622	157,2
115	703	161,9	704	162,0	698	161,6	705	162,0	720	163,0	727	163,4	726	163,3	741	164,2	739	164,1	734	163,8	727	163,4	723	163,1	709	162,3	693	161,3	667	159,4	639	158,1	628	157,5	630	157,6	642	158,3
105	700	161,8	696	161,5	694	161,4	716	162,7	731	163,6	740	164,2	741	164,2	748	164,7	740	164,2	737	164,0	733	163,7	732	163,7	717	162,8	702	161,9	676	160,3	654	159,0	642	158,3	648	158,7	662	159,5
95	682	160,7	680	160,6	697	161,6	730	163,8	747	164,6	750	164,8	747	164,6	746	164,6	741	164,2	736	164,0	730	163,6	723	163,1	718	162,8	705	162,0	684	160,8	663	159,5	649	158,7	663	159,5	675	160,3
85	660	159,4	683	160,7	713	162,5	747	164,6	753	165,0	750	164,8	747	164,6	737	164,0	732	163,7	730	163,6	730	163,6	723	163,1	715	162,6	703	161,9	679	160,5	659	159,3	655	159,1	661	159,4	677	160,4
75			692	161,3	734	163,8	760	165,4	753	165,0	742	164,3	736	164,0	726	163,3					719	162,9	718	162,9	711	162,4	700	161,8	676	160,3	662	159,5	646	158,6			682	160,7		
65			720	163,0	751	164,9	763	165,6	747	164,6	735	163,9	719	162,9							715	162,6	711	162,4	704	162,0	694	161,4	675	160,3	653	159,0								
55			747	164,6	764	165,7	757	165,2	733	163,7	725	163,3	674	160,2							716	162,6	709	162,3	703	161,9	692	161,3	665	159,7	434	147,6								
45			767	165,9	762	165,6	742	164,3	718	162,9	712	162,5									712	162,5	708	162,2	700	161,8	687	161,0	652	158,9								
35			767	165,9	744	164,4	729	163,5	718	162,9											713	162,5	707	162,2	694	161,4	673	160,1	608	156,4								
25			765	165,7	732	163,7	725	163,3	715	162,6											710	162,4	698	161,6	682	160,7	649	158,7										
15			749	164,7	722	163,1	718	162,9													710	162,4	687	161,0	666	159,7	597	155,8										
5					721	163,0																																

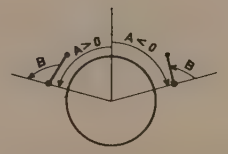
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	681	160,6	691	161,2	697	161,6	704	162,0	711	162,4	709	162,3	711	162,4	710	162,4	708	162,2	707	162,1	704	162,0	698	161,7	667	159,8	610	156,5	502	150,8	452	148,4	462	148,9	497	159,5	509	151,1
135	701	161,8	705	162,0	706	162,1	710	162,4	719	162,9	722	163,1	723	163,1	727	163,4	727	163,4	725	163,3	723	163,1	716	162,7	710	162,4	688	161,0	661	159,4	598	155,9	573	154,5	584	155,1	598	155,9
125	704	162,0	708	162,2	699	161,7	715	162,7	728	163,5	730	163,6	731	163,6	741	164,2	740	164,2	738	164,1	736	163,9	732	163,7	724	163,2	711	162,4	684	160,8	653	159,0	609	156,4	615	156,8	634	157,9
115	699	161,7	702	161,9	696	161,5	718	162,9	731	163,6	744	164,4	743	164,3	749	164,7	745	164,5	741	164,2	739	164,1	735	163,9	732	163,7	717	162,8	700	161,8	665	159,7	638	158,1	640	158,2	658	159,4
105	687	161,0	690	161,2	694	161,4	731	163,6	743	164,4	750	164,8	750	164,8	745	164,5	743	164,3	741	164,2	739	164,1	735	163,9	732	163,7	719	162,9	702	161,9	673	160,1	652	158,9	660	159,4	670	160,0
95	667	159,8	680	160,6	710	162,4	744	164,4	755	165,1	753	165,0	743	164,3	741	164,2	737	164,0	736	164,0	734	163,8	736	163,9	731	163,6	720	163,0	705	162,1	675	160,3	661	159,4	667	159,8	678	160,5
85	635	157,9	685	160,8	728	163,5	759	165,4	760	165,4	751	164,9	735	163,9	731	163,6	729	163,5	725	163,3	733	163,7	730	163,6	723	163,2	724	163,2	705	162,1	673	160,1	661	159,4	669	159,9	664	159,6
75			708	162,2	745	164,5	765	165,7	754	165,0	741	164,2	725	163,3	717	162,8					725	163,3	724	163,2	723	163,2	717	162,8	700	161,8	671	160,0	658	159,3					685	160,8
65			739	164,1	763	165,6	768	166,0	744	164,4	731	163,6	714	162,6							718	162,9	718	162,9	722	163,1	714	162,6	692	161,3	662	159,5								
55			755	165,1	769	166,0	759	165,4	732	163,7	720	163,0									714	162,6	720	163,0	715	162,7	706	162,1	689	161,1	589	155,4								
45			768	166,0	760	165,4	744	164,4	725	163,3	705	162,0									713	162,5	715	162,6	716	162,7	700	161,8	668	159,0								
35			774	166,3	747	164,6	732	163,7	715	162,7	669	159,9									713	162,5	717	162,8	710	162,4	684	160,8	619	157,0								
25			766	165,8	733	163,7	724	163,2	706	162,0											719	162,9	712	162,5	695	161,5	660	159,4										
15			747	164,6	725	163,3	721	163,0	665	159,7											715	162,6	702	161,9	676	160,3												
5					723	163,1																																



TUBE N° 38 (Q.II)

A \ B	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	634	157,9	644	158,5	656	159,1	662	159,5	669	159,9	674	160,2	685	160,8	664	159,6	665	159,7	660	159,0	655	159,1	642	158,3	592	155,5							437	147,7	473	149,4	480	149,7
135	678	160,5	684	160,8	691	161,2	697	161,6	696	161,5	711	162,4	704	162,0	703	161,9	699	161,7	705	162,0	702	161,9	698	161,7	686	160,8	651	158,9	604	156,2	540	152,8	541	152,8	560	153,8	574	154,5
125	684	160,8	697	161,6	696	161,6	699	161,7	708	162,3	718	162,9	720	163,0	710	162,4	718	162,9	717	162,8	711	162,4	710	162,4	698	161,7	681	160,6	653	159,0	612	156,6	593	155,6	598	155,9	612	156,6
115	685	160,8	695	161,6	695	161,6	711	162,4	714	162,6	728	163,5	728	163,5	722	163,1	724	163,2	725	163,3	722	163,1	717	162,8	708	162,3	693	161,3	668	159,8	641	158,3	626	157,4	622	157,2	636	158,0
105	678	160,5	687	161,0	700	161,8	716	162,7	725	163,3	734	163,8	732	163,7	722	163,1	722	163,1	730	163,6	726	163,4	717	162,8	708	162,3	689	161,1	678	160,5	654	159,0	644	158,4	643	158,4	654	159,0
95	660	159,4	680	160,6	707	162,2	725	163,3	739	164,1	741	164,2	732	163,7	723	163,1	724	163,2	725	163,3	719	162,9	719	162,9	709	162,3	697	161,6	676	160,3	656	159,1	650	158,8	657	159,2	669	159,9
85	644	158,5	685	160,8	716	162,7	741	164,2	741	164,2	736	164,0	724	163,2	714	162,6	715	162,7	717	162,8	718	162,9	715	162,7	710	162,4	694	161,4	673	160,1	658	159,3	652	158,9	666	159,7	677	160,4
75			700	161,8	734	163,8	741	164,2	737	164,0	730	163,6	712	162,5	706	162,1					708	162,3	708	162,3	700	161,8	692	161,3	674	160,2	652	158,9	646	158,6					678	160,5
65			725	163,3	740	164,2	743	164,4	730	163,6	721	163,0	703	161,9							708	162,3	702	161,9	696	161,5	690	161,2	675	160,3	647	158,6							
55			745	164,5	750	164,8	734	163,8	726	163,7	711	162,4									700	161,8	702	161,9	692	161,3	683	160,7	667	159,8	576	154,7							
45			755	161,5	746	164,6	722	163,1	710	162,5	695	161,5									701	161,8	700	161,8	692	161,3	675	160,3	649	158,7								
35			750	164,8	732	163,7	713	162,5	703	161,9											697	161,6	694	161,4	690	161,2	665	159,7	598	155,9								
25			741	164,2	714	162,6	702	161,9	692	161,3											699	161,7	690	161,2	677	160,4	645	158,5										
15			729	163,5	705	162,0	703	162,0													698	161,7	683	160,7	656	159,1	586	155,2										
5					700	161,8																			639	158,1												

A \ B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	678	160,5	673	160,1	676	160,3	684	160,8	686	160,9	692	161,3	699	161,7	696	161,6	694	161,4	697	161,6	684	160,8	680	160,6	648	158,7	576	154,6	454	148,5	449	148,3	460	148,8	480	149,8	483	149,9
135	690	161,2	684	160,8	687	161,0	695	160,5	698	161,7	702	161,9	707	161,2	708	162,3	712	162,5	707	161,2	705	162,0	704	162,0	692	161,3	681	160,6	630	157,6	570	154,3	559	153,7	566	154,1	575	154,6
125	690	161,2	687	161,0	682	160,7	697	161,6	702	161,9	711	162,4	719	162,9	723	163,2	722	163,1	722	163,1	722	163,1	720	163,0	706	162,1	699	161,7	664	159,6	624	157,3	599	155,9	593	155,6	612	156,6
115	684	160,8	673	160,1	678	160,5	693	161,3	708	162,3	721	163,0	727	163,4	735	163,9	726	163,4	723	163,1	723	163,1	729	163,5	712	162,5	709	162,3	682	160,7	648	158,7	623	155,7	620	157,1	634	157,9
105	670	160,0	660	159,4	682	160,7	701	161,8	719	162,9	729	163,5	741	164,3	734	163,9	730	163,6	730	163,6	724	163,2	729	163,5	717	162,8	709	162,3	682	160,7	660	159,4	639	158,1	635	158,0	648	158,7
95	646	158,6	642	158,3	702	161,9	718	162,9	733	163,7	738	164,1	732	163,7	730	163,6	725	163,3	722	163,1	722	163,1	720	163,0	718	162,9	711	162,4	685	160,8	663	159,5	644	158,5	645	158,5	659	159,3
85	613	158,7	645	158,5	724	163,2	731	163,6	740	164,2	740	164,2	728	163,5	723	163,2	720	163,0	717	162,8	723	163,1	719	162,9	717	162,8	707	162,2	681	160,6	661	159,4	644	158,5	650	158,8	664	159,6
75			673	160,1	738	164,1	737	164,0	736	164,0	733	163,7	724	163,2	712	162,5					709	162,3	716	162,7	711	162,4	703	161,9	682	160,7	658	159,3	644	158,5					658	159,3
65			705	162,0	752	164,9	745	164,5	737	164,0	722	163,1	7171	162,8							712	162,5	713	162,5	708	162,2	703	161,9	676	160,3	650	158,8							
55			725	163,3	752	164,9	743	164,3	721	163,0	716	162,7									707	162,2	707	162,2	708	162,2	693	161,3	666	159,8								
45			745	164,5	745	164,5	731	163,6	718	162,9	705	162,0									707	162,2	705	162,0	704	162,0	688	160,5	645	158,5								
35			754	165,0	733	163,7	723	163,1	706	162,1											707	162,2	704	162,0	695	161,5	667	159,8										
25			751	164,9	718	162,9	713	162,5	702	161,9											704	162,0	697	161,6	678	160,5	644	158,5										
15			740	164,2	715	162,6	708	162,3													700	161,8	681	160,6	660	159,4												
5																																						



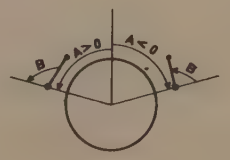
TUBE N° 45 (M.I.)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	677	156,1	675	156,0	682	156,4	688	156,7	702	157,5	707	157,7	707	157,7	703	157,5	701	157,4	694	157,0
135	688	156,7	691	156,9	703	157,5	705	157,6	710	157,9	717	158,3	721	158,5	713	158,1	716	158,2	710	157,9
125	692	156,9	703	157,5	704	157,6	709	157,8	716	158,2	716	158,2	729	158,9	724	158,6	724	158,6	724	158,6
115	693	157,0	698	157,3	700	157,4	714	158,1	723	158,6	731	159,0	735	159,2	732	159,1	730	159,0	726	158,8
105	683	156,5	692	156,9	696	157,1	718	158,3	731	159,0	738	159,4	738	159,4	735	159,2	731	159,0	729	158,9
95	668	155,7	677	156,1	695	157,1	727	158,8	737	159,4	743	159,7	739	159,5	734	159,2	726	158,8	726	158,8
85	647	154,6	680	156,3	711	157,9	731	159,0	746	159,9	745	159,8	737	159,4	730	159,0	722	158,5	721	158,5
75			697	157,2	728	158,9	747	159,9	748	160,0	739	159,5	730	159,0	721	158,5				
65			720	158,4	740	159,5	751	160,1	745	159,8	736	159,3	724	158,6						
55			739	159,5	749	160,0	749	160,0	735	159,2	727	158,8	699	157,3						
45			747	158,9	749	160,0	746	159,9	733	159,1	722	158,5								
35			755	160,3	746	159,9	735	159,2	728	158,9										
25			757	160,5	737	159,4	727	158,8	723	158,6										
15			753	160,2	727	158,8	722	158,5												
5					720	158,4	697	157,2												

B \ A	140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	693	157,0	685	156,6	661	155,3	621	153,2	501	147,4	434	144,3	454	145,2	494	147,0	506	147,6
135	710	157,9	708	157,8	696	157,1	680	156,3	643	154,4	587	151,5	555	149,9	562	150,3	575	150,9
125	721	158,5	715	158,2	708	157,8	700	157,4	671	155,8	630	153,7	604	152,4	594	151,9	611	152,7
115	726	158,8	720	158,4	712	158,0	706	157,7	678	156,2	657	155,1	627	153,5	618	153,1	632	153,8
105	728	158,9	718	158,3	715	158,2	710	157,9	688	156,7	653	154,9	638	154,1	636	154,0	645	154,5
95	727	158,8	720	158,4	711	157,9	707	157,7	682	156,3	661	155,3	640	154,2	647	154,6	656	155,0
85	722	158,5	716	157,7	710	157,9	706	157,7	682	156,3	659	155,2	641	154,3	653	154,9	663	155,4
75	717	158,3	714	158,1	707	157,7	706	157,7	677	156,1	654	154,9	638	154,1			664	155,5
65	711	157,9	707	157,7	704	157,6	701	157,4	676	156,1	650	154,7						
55	706	157,7	707	157,7	697	157,2	696	157,1	670	155,8	626	153,5						
45	705	157,6	704	157,5	700	157,4	686	156,6	656	155,0								
35	702	157,5	702	157,5	694	157,0	675	156,0	597	152,0								
25	705	157,6	702	157,5	687	156,7	650	154,7										
15	707	157,7	696	157,1	667	155,6	615	152,9										
5					645	154,5												

B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	654	154,9	660	155,2	667	155,6	673	155,9	681	156,3	690	156,8	687	156,7	685	156,6	683	156,5	670	155,8
135	690	156,8	691	156,9	694	157,0	699	157,3	707	157,7	704	157,6	708	157,8	706	157,7	710	157,9	706	157,7
125	704	157,6	707	157,7	703	157,5	708	157,8	710	157,9	715	158,2	722	158,5	719	158,4	722	158,5	714	158,1
115	702	157,5	702	157,5	699	157,3	705	157,6	718	158,3	722	158,5	725	158,7	728	158,9	728	158,9	722	158,5
105	692	156,9	691	156,9	696	157,1	707	157,7	722	158,5	721	158,5	729	158,9	729	158,9	722	158,5	713	158,1
95	676	156,1	677	156,1	693	157,0	714	158,1	733	159,1	730	159,0	726	158,8	721	158,5	720	158,4	714	158,1
85	658	156,2	671	155,8	698	157,3	728	158,9	738	159,4	729	158,9	727	158,8	720	158,4	717	158,3	712	158,0
75			676	156,1	717	158,3	734	159,2	737	159,4	721	158,5	723	158,5	716	158,2				
65			702	157,5	728	158,9	741	159,6	733	159,1	722	158,5	718	158,3						
55			725	158,7	740	159,5	738	159,4	726	158,8	713	158,1	705	157,6						
45			739	159,5	740	159,5	730	159,0	721	158,5	708	157,8								
35			749	160,0	738	159,4	725	158,7	712	158,0	702	157,5								
25			744	159,7	729	158,9	715	158,2	708	157,8										
15			745	159,8	721	158,5	712	158,0	701	157,4										
5					709	157,8														

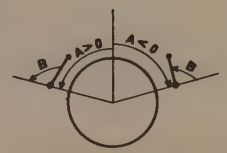
B \ A	-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	665	155,5	660	155,2	635	154,0	570	150,7	432	144,2	367	141,3	401	142,8	454	145,1	484	146,6
135	700	157,4	693	157,0	688	156,7	667	155,6	642	154,3	578	151,1	525	148,5	539	149,2	552	149,8
125	718	158,3	712	158,0	706	157,7	690	156,8	671	155,8	634	153,9	593	151,8	585	151,4	592	151,8
115	720	158,4	715	158,2	712	158,0	700	157,4	682	156,4	654	154,9	624	153,3	613	152,3	618	153,1
105	719	157,8	717	158,3	712	158,0	704	157,6	688	156,7	662	155,3	639	154,2	625	153,4	640	154,2
95	720	158,4	713	158,1	711	157,9	700	157,4	687	156,7	665	155,5	641	154,3	639	154,2	651	154,8
85	715	158,2	709	157,8	712	158,0	701	157,4	680	156,3	660	155,2	640	154,2	645	154,5	658	155,1
75	707	157,7	702	157,5	705	157,6	695	157,1	682	156,4	657	155,1	639	154,2			659	155,2
65	698	157,3	702	157,5	703	157,5	695	157,1	673	155,9	652	154,8						
55	698	157,3	697	157,2	697	157,2	688	156,7	667	155,6	641	154,3						
45	690	156,8	695	157,1	697	157,2	683	156,5	657	155,1								
35	696	157,1	699	157,3	693	157,0	678	156,2	638	154,1								
25	699	157,3	698	157,3	685	156,6	657	155,1										
15	691	156,9	695	157,1	671	155,8												
5																		



TUBE N° 47 (N.I)

A \ B	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	635	154,0	657	155,1	654	154,9	657	155,1	664	155,5	675	156,0	673	155,9	667	155,6	660	155,2	655	155,0	650	154,7	626	153,5	578	151,1			274	137,5	272	137,4	352	140,7	412	143,3	438	144,5
135	686	156,6	687	156,7	702	157,5	699	157,3	702	157,5	712	158,0	708	157,8	704	157,6	707	157,7	708	157,8	706	157,7	704	157,6	704	157,6	672	155,9	629	153,6	543	149,4	524	148,4	529	148,7	546	149,5
125	694	157,0	702	157,5	713	158,1	708	157,8	713	158,1	721	158,5	720	158,4	716	158,2	722	158,5	720	158,4	716	158,2	720	158,4	718	158,3	701	157,4	678	156,2	622	153,3	585	151,4	581	151,2	588	151,6
115	695	157,1	698	157,3	709	157,8	704	157,6	715	158,2	729	158,9	729	158,9	722	158,5	727	158,8	729	158,9	717	158,3	728	158,9	728	158,9	706	157,7	690	156,8	658	155,1	681	153,1	604	152,4	623	153,3
105	687	156,7	691	156,9	708	157,8	712	158,0	720	158,4	733	159,1	734	159,2	723	158,6	731	159,0	727	158,8	726	158,8	730	159,0	731	159,0	713	158,1	693	157,0	667	155,6	637	154,1	625	153,4	643	154,4
95	675	156,0	681	156,3	707	157,7	719	158,4	730	159,0	739	159,5	733	159,1	728	158,9	729	158,9	723	158,6	724	158,6	725	159,2	729	158,9	714	158,1	701	157,4	671	155,8	646	154,5	642	154,3	655	155,0
85	653	154,9	672	155,9	713	158,1	727	158,8	737	159,4	744	159,7	728	158,9	719	158,4	719	158,4	722	158,5	723	158,6	727	158,8	725	158,7	714	158,1	695	157,1	670	155,8	647	154,6	644	154,4	663	155,4
75			688	156,7	730	159,0	738	159,4	739	159,5	737	159,4	722	158,5							717	158,3	726	158,8	723	158,6	711	157,9	693	157,0	668	155,7	642	154,3			667	155,6
65			713	158,1	743	159,7	740	159,5	739	159,5	733	159,1	718	158,3							708	157,8	721	158,5	716	158,2	706	157,7	686	156,6	662	155,3							
55			730	159,0	753	160,2	739	159,5	737	159,4	728	158,9	704	157,6							703	157,5	719	158,4	718	158,3	703	157,5	683	156,5	650	154,7							
45			747	159,9	758	160,5	730	159,0	730	159,0	718	158,3									704	157,6	721	158,5	709	157,8	695	157,1	674	156,0									
35			753	160,2	748	160,0	723	158,6	721	159,0											704	157,6	718	158,3	706	157,7	689	156,8	654	154,9									
25			755	160,3	743	159,7	715	158,2	716	158,2											702	157,5	718	158,3	698	157,3	674	156,0											
15			753	160,2	732	159,1	710	157,9													704	157,6	717	158,3	682	156,4	653	154,9											
5					724	158,6																			659	155,2													

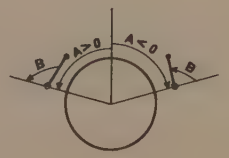
A \ B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	665	155,5	672	155,9	680	156,3	684	156,5	694	157,0	697	157,2	697	157,2	695	157,1	693	157,0	697	157,2	689	156,8	687	156,7	678	156,2	640	154,2	575	150,9	481	146,4	455	145,2	492	146,9	499	147,3
135	682	156,4	688	156,7	693	157,0	692	156,9	703	157,5	706	157,7	707	157,7	710	157,9	713	158,1	714	158,1	712	158,0	702	157,5	701	157,4	684	156,5	664	155,5	613	152,8	561	150,2	551	149,7	568	150,6
125	686	156,6	692	156,9	698	157,3	696	157,1	712	158,0	713	158,1	716	158,2	721	158,5	720	158,4	721	158,5	718	158,3	714	158,1	711	157,9	691	156,9	677	156,1	644	154,4	613	152,8	592	151,8	601	152,2
115	682	156,4	684	156,5	687	156,7	700	157,4	707	157,7	716	158,2	720	158,4	720	158,4	721	158,5	724	158,6	721	158,5	718	158,3	719	158,4	699	157,3	689	156,8	661	155,3	629	153,6	619	153,1	622	153,3
105	671	155,8	674	156,0	680	156,3	701	157,4	718	158,3	722	158,5	730	159,0	725	158,7	726	158,8	722	158,5	722	158,5	720	158,4	716	158,2	700	157,4	686	156,6	665	155,5	637	154,1	632	153,8	638	154,1
95	653	154,9	659	155,2	685	156,6	711	157,9	728	158,9	731	159,0	727	158,8	720	158,4	723	158,6	715	158,2	714	158,1	715	158,2	712	158,0	694	157,0	689	156,8	662	155,3	641	154,3	633	153,8	649	154,7
85	618	153,1	654	154,9	694	157,0	724	158,6	734	159,2	729	158,9	726	158,8	717	158,3	713	158,1	716	158,2	713	158,1	714	158,1	713	158,1	699	157,3	685	156,6	659	155,2	638	154,1	642	154,3	654	154,9
75			668	155,7	712	158,0	731	159,0	740	159,7	724	158,6	722	158,5	711	157,9					707	157,7	706	157,7	706	157,7	690	156,8	681	156,3	654	154,9	632	153,8			653	154,9		
65			702	157,5	724	158,6	739	159,5	736	159,3	720	158,6	710	157,9							699	157,3	705	157,6	705	157,6	686	156,6	678	156,2	652	154,8								
55			722	158,5	735	159,2	737	159,4	724	158,6	717	158,3	700	157,4							692	156,9	701	157,4	700	157,4	688	156,7	673	155,9	626	153,5								
45			738	159,4	736	159,3	730	159,0	717	158,3	709	157,8									693	157,0	703	157,5	695	157,1	675	156,0	652	154,8									
35			747	159,9	732	159,1	722	158,5	711	157,4	701	157,4									693	157,0	700	157,4	690	156,8	662	155,3	613	152,8									
25			746	159,9	727	158,8	718	158,3	709	157,8											695	157,1	697	157,2	674	156,0	639	154,2											
15			740	159,5	721	158,5	708	157,8	702	157,5											696	157,1	688	156,7	655	155,0													
5					713	158,0																																	



TUBE N° 56 (M.II)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C,
145	580	154,9	586	155,2	597	155,8	604	156,2	614	156,7	617	156,9	611	156,6	605	156,2	608	156,4	593	155,6	600	156,0	584	155,1	538	152,6									420	147,0	418	147,0
135	618	157,0	620	155,7	629	157,6	632	157,8	640	158,2	645	158,5	642	158,2	639	158,1	642	158,2	635	157,9	633	157,8	635	157,9	622	157,2	596	155,7	550	153,3	475	149,5	478	149,7	493	150,3	511	151,2
125	620	157,1	626	157,4	633	157,8	641	158,3	652	158,9	653	159,0	651	158,8	652	158,9	649	158,7	646	158,6	644	158,4	649	158,7	638	158,1	620	157,1	595	155,7	545	153,0	520	151,7	527	152,1	548	153,2
115	617	156,9	621	157,1	637	158,0	646	158,6	662	159 5	663	159,5	658	159,3	652	158,9	658	159,3	657	159,2	650	158,8	652	158,9	644	158,5	635	157,9	612	156,6	572	154,4	546	153,1	549	153,2	573	154,5
105	607	156,3	619	157,0	641	158,3	657	159,2	668	159,9	663	159,5	662	159,5	657	159,2	658	159,3	656	159,1	651	158,8	653	159,0	648	158,7	636	158,0	617	156,9	583	155,0	563	154,0	568	154,2	585	155,1
95	593	155,6	612	156,6	650	158,8	664	159,6	667	159,8	670	160,0	658	159,3	652	158,9	656	159,1	653	159,0	654	159,0	653	159,0	644	158,5	633	157,8	617	156,9	585	155,1	570	154,3	581	154,9	601	156,0
85	576	154,6	625	157,3	657	159,2	672	160,1	673	160,1	671	160,0	658	159,3	658	159,3	652	158,9	653	159,0	646	158,6	650	158,8	641	158,3	632	157,7	617	156,9	586	155,2	580	154,9	591	155,5	601	156,0
75			645	158,5	668	159,9	677	160,4	673	160,1	664	159,6	657	159,2	648	158,7					642	158,3	647	158,6	637	158,0	630	157,6	616	156,9	583	155,0	572	154,4					611	156,6
65			662	159,5	679	160,5	673	160,1	671	160,0	661	159,4	647	158,6							639	158,1	644	158,5	638	158,1	629	157,2	611	156,6	578	154,8								
55			673	160,2	682	160,7	667	159,8	666	159,7	650	158,8	619	157,0							640	158,2	648	158,7	634	157,9	621	157,2	602	156,1	493	150,3								
45			680	160,6	677	160,4	664	159,6	658	159,2	640	158,2									637	158,0	644	158,5	629	157,6	613	156,7	580	154,9								
35			686	160,9	674	160,2	657	159,2	652	158,9											637	158,0	642	158,3	623	157,2	597	155,8	513	151,3								
25			683	160,7	668	159,9	653	159,0	643	158,4											637	158,0	640	158,2	613	156,7	572	154,4										
15			670	160,0	658	159,4															637	158,0	629	157,6	590	155,4	512	151,3										
5																																						

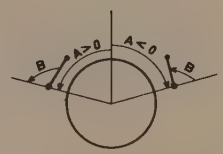
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	601	156,0	609	156,4	623	157,2	620	157,1	634	157,9	638	158,1	638	158,1	633	157,8	631	157,7	625	158,5	618	157,0	617	156,9	592	155,5	528	152,1	400	146,2					422	147,1	411	146,6
135	616	156,8	620	157,1	635	157,9	631	157,7	642	158,3	652	158,9	648	158,7	648	158,7	648	158,7	643	158,4	638	158,1	639	158,1	630	157,6	611	156,6	570	154,3	493	155,5	482	149,8	493	150,3	508	151,1
125	617	156,9	627	157,5	632	157,8	632	157,8	648	158,7	653	159,0	659	159,3	658	159,3	657	159,2	652	158,9	643	158,4	648	158,7	640	158,2	631	157,7	603	156,1	553	153,4	527	152,0	521	151,7	538	152,7
115	610	156,5	620	157,1	635	157,9	640	158,2	657	159,1	664	159,6	664	159,6	662	159,5	655	159,1	658	159,3	651	158,9	656	159,1	649	158,7	634	157,9	610	156,5	574	154,5	555	153,5	541	152,8	561	153,8
105	598	155,9	608	156,4	637	158,0	647	158,6	663	159,5	668	159,9	664	159,6	664	159,6	655	159,1	653	159,0	648	158,7	651	158,9	645	158,5	637	158,0	616	156,9	579	154,8	564	154,0	558	153,7	574	154,5
95	585	155,1	607	156,3	643	158,4	659	159,3	670	160,0	670	160,0	662	159,5	658	159,3	654	159,0	654	159,0	648	158,7	651	158,9	646	158,6	635	157,9	610	156,5	580	154,9	570	154,3	572	154,4	585	155,1
85	563	153,9	619	157,0	661	159,4	666	159,9	675	160,2	666	159,7	659	159,3	649	158,7	647	158,6	646	158,6	639	158,1	643	158,4	643	158,4	629	157,6	612	156,6	584	155,1	574	154,5	578	154,8	594	155,6
75			645	158,5	672	160,1	671	160,0	668	159,9	665	159,7	652	158,9	646	158,6					636	158,0	645	158,5	639	158,1	630	157,6	613	156,6	580	154,9	569	154,3					599	155,9
65			663	159,5	677	160,4	672	160,1	663	159,5	656	159,1	641	158,3							631	157,7	641	158,3	638	158,1	626	157,4	605	156,2	570	154,3								
55			671	160,0	676	160,3	668	159,9	659	159,3	648	158,7									632	157,7	637	158,0	634	157,9	621	157,1	589	155,3								
45			679	160,5	672	160,1	664	159,6	651	158,8	641	158,3									630	157,7	639	158,1	631	157,7	611	156,6	570	154,3								
35			678	160,5	666	159,7	653	159,0	645	158,5											634	157,9	636	158,0	627	157,5	595	155,7										
25			679	160,5	659	159,3	642	158,3	636	158,0											637	158,0	631	157,7	606	156,3												
15			670	160,0	650	158,8	646	158,6													634	157,9	618	157,0	586	155,2												
5					642	158,3																																



TUBE N° 58 (L.II)

A / B	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	538	152,7	553	153,4	565	154,0	582	155,0	587	155,2	591	155,4	596	155,8	570	154,3	570	154,3	575	154,6	568	154,2	554	153,5	501	150,7												
135	580	154,9	589	155,3	602	156,1	615	156,8	624	157,3	628	157,5	618	157,0	611	156,6	615	156,8	617	156,9	615	156,8	608	156,4	588	155,3	574	154,5	526	152,0	447	148,2	440	147,9	461	148,9	473	149,4
125	588	155,3	600	156,0	612	156,6	627	157,5	634	157,9	638	158,1	632	157,8	627	157,5	629	157,6	627	157,5	622	157,2	617	156,9	604	156,2	585	155,1	575	154,6	522	151,8	493	150,3	500	150,7	508	151,1
115	580	154,9	597	155,8	605	156,2	627	157,5	635	157,9	647	158,6	638	158,1	632	157,8	636	158,0	630	157,6	625	157,3	621	157,1	604	156,2	600	156,0	594	155,6	558	153,7	528	152,1	522	151,8	535	152,5
105	569	154,3	585	155,1	618	157,0	639	158,1	646	158,6	652	158,9	643	158,4	635	157,9	632	157,8	631	157,7	634	157,9	623	157,2	616	156,8	614	156,7	600	156,0	564	164,0	542	152,9	548	153,2	561	153,9
95	554	153,5	587	155,2	620	157,1	643	158,4	649	158,7	657	159,2	645	158,5	635	157,9	632	157,8	631	157,7	628	157,5	622	157,2	618	157,0	612	156,6	597	155,8	568	154,2	550	153,3	563	153,9	575	154,6
85	529	152,2	603	156,1	633	157,8	650	158,8	656	159,1	654	159,0	635	157,9	630	157,7	624	157,3	623	157,2	625	157,3	620	157,1	613	156,7	606	156,3	599	155,8	568	154,2	558	153,7	572	154,4	579	154,8
75			626	157,4	644	158,5	655	159,1	657	159,2	649	158,7	632	157,8	625	157,3					625	157,3	611	156,6	614	156,7	603	156,1	595	155,7	562	153,9	553	153,4			583	155,0		
65			644	158,5	654	159,0	659	159,3	651	158,8	643	158,4	624	157,3							617	156,9	610	156,5	613	156,7	599	155,9	590	155,4	555	153,5								
55			655	159,1	656	159,1	655	159,1	638	158,1	632	157,8	580	154,9							612	156,6	608	156,4	611	156,5	598	155,9	573	154,5	510	151,2								
45			664	159,6	655	159,1	650	158,8	637	158,0	625	157,3									609	156,4	608	156,4	603	156,1	592	155,5	555	153,5								
35			665	159,7	654	159,0	640	158,2	629	157,6											611	156,5	607	156,3	593	155,6	570	154,3	494	150,4								
25			658	159,3	647	158,6	633	157,8	620	157,1											615	156,8	600	156,0	581	154,9	546	153,1										
15			658	159,3	632	157,8	626	157,4													612	156,6	591	155,5	559	153,7	488	150,1										
5					630	157,6																			539	152,7												

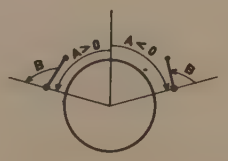
A / B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	592	155,5	597	155,8	612	156,6	620	157,1	615	156,8	631	157,7	634	157,9	629	157,6	620	157,1	623	157,2	581	154,9	591	155,5	568	154,2	495	155,4										
135	613	156,7	612	156,6	622	157,2	624	157,3	631	157,7	642	158,3	648	158,7	648	158,7	644	158,5	643	158,4	610	156,5	612	156,6	604	156,2	588	155,3	547	153,1	460	148,8	445	148,1	460	148,8	478	149,7
125	607	156,3	610	156,5	622	157,2	624	157,3	631	157,7	654	159,0	651	158,8	652	158,9	656	159,1	652	158,9	618	157,0	622	157,2	616	156,7	604	156,2	580	154,9	532	152,3	493	150,3	491	150,2	510	151,2
115	600	156,0	596	155,8	618	157,0	633	157,8	643	158,4	662	159,5	662	159,5	662	159,5	658	159,3	657	159,2	621	157,1	628	157,5	621	157,1	613	156,7	590	155,4	556	153,6	518	151,6	519	151,6	536	152,5
105	580	154,9	587	155,2	616	156,9	643	158,4	655	159,1	667	159,8	662	159,5	660	159,4	658	159,3	657	159,2	621	157,1	632	157,8	622	157,2	616	156,8	596	155,8	569	154,3	534	152,4	536	152,5	547	153,1
95	564	154,0	585	155,1	643	158,4	653	159,0	667	159,8	666	159,8	660	159,4	658	159,3	653	159,0	654	159,0	621	157,1	631	157,7	625	157,3	616	156,8	598	155,8	563	153,9	545	153,0	548	153,2	565	154,0
85	542	152,9	596	155,7	660	159,4	662	159,5	666	159,8	662	159,5	657	159,2	650	158,8	653	159,0	648	158,7	611	156,6	622	157,2	621	157,1	616	156,8	596	155,8	565	154,0	548	153,2	557	153,6	573	154,5
75			628	157,5	678	160,5	662	159,5	659	159,3	660	159,4	649	158,7	642	158,3					608	156,4	615	156,8	617	156,9	609	156,4	588	155,3	561	153,8	548	153,2			581	154,9		
65			660	159,4	678	160,5	660	159,4	657	159,2	652	158,9	646	158,6							607	156,3	616	156,8	612	156,6	604	156,2	584	155,1	548	153,2								
55			675	160,3	682	160,7	657	159,2	657	159,2	645	158,5	612	156,6							604	156,2	616	156,8	608	156,4	600	156,0	576	154,7										
45			680	160,6	678	160,5	654	159,0	648	158,7	638	158,1									604	156,2	615	156,8	608	156,4	588	155,3	547	153,1									
35			680	160,6	673	160,1	645	158,5	640	158,2											604	156,2	611	156,6	598	155,9	570	154,3										
25			673	160,1	667	159,8	636	158,0	635	157,9											606	156,3	603	156,1	580	154,9	542	152,9										
15			674	160,2	655	159,1	632	157,8													606	156,3	594	155,6	557	153,6										
5																																						



TUBE N° 65 (R.I)

A / B	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	546	149,5	557	150,0	570	150,7	583	151,3	588	151,6	590	151,7	605	152,4	611	152,7	594	151,9	594	151,9	580	151,2	567	150,5	503	147,4	312	139,0	170	133,5	185	134,1	249	136,5	334	140,4	362	141,1
135	608	152,6	608	152,6	623	153,3	628	153,6	634	153,9	631	153,7	643	154,4	644	154,4	645	154,5	643	154,4	642	154,3	640	154,2	621	153,2	600	152,2	553	149,8	454	145,2	434	144,3	451	145,0	468	145,8
125	606	152,5	614	152,9	622	153,3	634	153,9	647	154,6	647	154,6	651	154,8	660	155,2	656	155,0	658	155,1	658	155,1	652	154,8	631	153,7	628	153,6	605	152,4	549	149,7	499	147,3	492	146,9	511	147,8
115	601	152,2	609	152,6	624	153,4	635	154,0	652	154,8	656	155,0	667	155,6	668	155,7	664	155,5	668	155,7	665	155,5	660	155,2	643	154,4	640	154,2	621	153,2	585	151,4	539	149,2	525	148,5	539	149,2
105	589	151,6	599	152,1	617	153,0	642	154,3	663	155,4	660	155,2	668	155,7	671	155,8	666	155,6	669	155,7	669	155,7	659	155,2	648	154,6	640	154,2	632	153,8	596	152,0	558	150,1	543	149,4	562	150,3
95	574	150,9	582	151,3	623	153,3	659	155,2	669	155,7	668	155,7	668	155,7	668	155,7	667	155,6	667	155,6	664	155,5	655	155,0	646	154,5	639	154,2	626	153,4	598	152,1	567	150,5	559	150,1	577	151,0
85	552	149,8	583	151,3	644	154,4	669	155,7	678	156,2	673	155,9	670	155,8	664	155,5	661	155,3	661	155,3	661	155,3	656	155,0	640	154,2	643	154,4	625	153,4	596	152,0	568	151,1	573	150,8	583	151,3
75			612	152,8	666	155,6	676	156,1	676	156,1	667	155,6	665	155,5							654	154,9	650	154,7	640	154,2	639	154,2	623	153,3	589	151,6	563	150,3					591	151,7
65			645	154,5	675	156,0	679	156,2	676	156,1	664	155,5	660	155,2							650	154,7	647	154,6	635	154,0	631	153,7	618	153,1	583	151,3								
55			666	155,6	682	156,4	680	156,3	669	157,7	653	154,9	651	154,8							647	154,6	640	154,2	632	153,8	628	153,6	610	152,7	574	150,9								
45			678	156,2	686	156,6	675	156,0	662	155,3	647	154,6									644	154,4	640	154,2	633	153,8	622	153,3	598	152,1										
35			685	156,6	681	156,3	672	155,9	652	154,8											645	154,5	639	154,2	630	153,7	614	152,9	577	151,0										
25			686	156,6	675	156,0	653	154,9	645	154,5											644	154,4	637	154,1	622	153,3	601	152,2												
15			682	156,4	667	155,6	649	154,7													646	154,5	636	154,0	608	152,6	577	151,0												
5			674	156,0	654	154,9																			584	151,4														

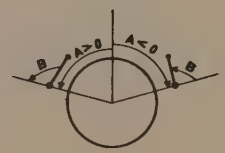
A / B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	612	152,8	616	153,0	624	153,4	633	153,8	636	154,0	633	153,8	630	153,7	636	154,0	637	154,1	635	154,0	623	153,3	629	153,6	609	152,6	581	151,2	497	147,2	392	142,4	386	142,2	434	144,3	441	144,6
135	618	153,1	622	153,3	628	153,6	641	154,3	643	154,4	642	154,3	644	154,4	646	154,5	652	154,8	649	154,7	638	154,1	643	154,4	629	153,6	621	153,2	590	151,7	538	149,1	485	146,6	488	146,7	498	147,2
125	617	153,0	620	153,2	627	153,5	638	154,1	649	154,7	651	154,8	649	154,7	658	155,1	660	155,2	651	154,8	647	154,6	653	154,9	638	154,1	631	153,7	610	152,7	578	151,1	532	148,8	520	148,3	530	148,7
115	602	152,3	611	152,7	621	153,2	640	154,2	659	155,2	656	155,0	653	154,9	663	155,4	663	155,4	661	155,3	651	154,8	654	154,9	642	154,3	636	154,0	620	153,2	594	151,9	557	150,0	546	149,5	552	149,8
105	590	151,7	596	152,0	622	153,3	650	154,7	666	155,6	664	155,4	650	155,0	662	155,3	664	155,5	658	155,1	651	154,8	655	155,0	644	154,4	640	154,2	622	153,3	592	151,8	566	150,5	561	150,2	568	150,6
95	571	150,7	584	151,4	634	153,9	662	155,3	670	155,8	669	155,7	659	155,2	663	155,4	662	155,3	656	155,0	649	154,7	653	154,9	639	154,2	632	153,8	619	153,1	597	152,0	570	150,7	567	150,5	582	151,3
85	546	149,5	591	151,7	657	155,1	661	155,3	678	156,2	666	155,6	652	154,8	657	155,1	654	154,9	647	154,6	642	154,3	648	154,6	634	153,9	631	153,7	616	153,0	594	151,9	568	150,6	574	150,9	586	151,5
75			618	153,1	671	155,8	663	155,4	676	156,1	665	155,5	647	154,6	650	154,7					636	154,0	640	154,2	633	153,8	632	153,8	617	153,0	586	151,5	561	150,2					589	151,6
65			653	154,9	682	156,4	668	155,7	671	155,8	659	155,2	639	154,2							632	153,8	636	154,0	633	153,8	624	153,4	606	152,5	575	150,9								
55			675	156,0	686	156,6	673	155,9	667	155,6	658	155,1	627	153,5							621	153,6	637	154,1	629	153,6	620	153,2	598	152,1	549	149,7								
45			682	156,4	688	156,7	668	155,7	660	155,2	647	154,6									632	153,8	635	153,9	633	153,8	612	152,8	577	151,0										
35			689	156,8	682	156,4	662	155,3	650	154,7	627	153,5									631	153,7	634	153,8	624	153,4	592	151,8	555	149,9										
25			689	156,8	678	156,2	653	154,9	643	154,4											631	153,7	626	153,5	606	152,5	573	150,8												
15			683	156,5	671	155,8	646	154,5	623	153,3											631	153,7	620	153,2	584	151,4														
5					665	155,5																																		



TUBE N° 67 (S.I)

A / B	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	570	150,7	568	150,6	565	150,4	601	152,2	608	152,6	603	152,3	598	152,1	595	151,9	595	151,9	592	151,8	577	151,0	565	150,4	537	149,1	441	144,6	272	137,4	243	136,3	297	138,4	357	140,9	391	142,4
135	607	152,5	592	151,8	598	152,1	629	153,6	628	153,6	627	153,5	628	153,6	628	153,6	626	153,5	626	153,5	625	153,4	616	153,0	602	152,3	596	152,0	552	149,8	453	145,1	428	144,0	444	144,7	468	145,8
125	604	152,4	605	152,4	607	152,5	631	153,7	639	154,2	638	154,1	639	154,2	638	154,1	640	154,2	636	154,0	637	154,1	628	153,6	620	153,2	620	153,2	596	152,0	535	149,0	491	146,9	481	146,4	504	147,5
115	601	152,2	598	152,1	606	152,5	636	154,0	644	154,4	650	154,7	646	154,5	649	154,7	646	154,5	645	154,5	643	154,4	634	153,9	625	153,4	633	153,8	612	152,8	566	150,5	519	148,2	509	147,7	527	148,6
105	588	151,6	585	151,4	607	152,5	646	154,0	655	155,0	651	154,8	652	154,8	649	154,7	653	154,9	649	154,7	640	154,2	633	153,8	628	153,6	632	153,8	622	153,3	574	150,9	531	148,8	530	148,7	552	149,8
95	570	150,7	582	151,3	619	153,1	656	155,0	665	155,5	659	155,2	652	154,8	651	154,8	646	154,5	642	154,3	640	154,2	633	153,8	627	153,5	630	153,7	617	153,0	575	150,9	544	149,4	549	149,7	567	150,5
85	547	149,6	575	150,9	636	154,0	665	155,5	667	155,6	652	154,8	647	154,6	645	154,5	640	154,2	637	154,1	633	153,8	627	153,5	630	153,7	632	153,8	613	152,8	572	150,8	541	149,3	558	150,1	576	151,0
75			608	152,6	652	154,8	674	156,0	666	155,6	651	154,8	644	154,4	640	154,2					631	153,7	626	153,5	623	153,3	627	153,5	609	152,6	565	150,4	536	149,0					577	151,0
65			603	152,3	661	155,3	676	156,1	667	155,6	649	154,7	636	154,0							625	153,4	624	153,4	620	153,2	625	153,4	601	152,2	559	150,1								
55			632	153,8	666	155,6	669	155,7	658	155,1	645	154,5	627	153,5							618	152,6	617	153,0	619	153,1	621	153,2	593	151,8	547	149,6								
45			654	154,9	671	155,8	667	155,6	649	154,7	634	153,9									618	152,6	616	153,0	618	153,1	611	152,7	582	151,3								
35			663	155,4	670	155,8	660	155,2	640	154,2											619	152,6	615	152,9	609	152,6	605	152,4	552	149,8								
25			667	155,6	661	155,3	649	154,7	633	153,8											621	153,2	612	152,8	608	152,6	582	151,3										
15			663	155,4	656	155,0	643	154,4													615	152,9	613	152,8	584	151,4	561	150,2										
5					648	154,6																			561	150,2												

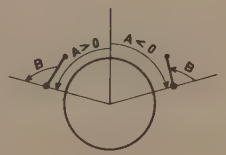
A / B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	586	151,5	591	151,7	599	152,1	608	152,6	615	152,9	614	152,9	620	153,2	625	153,4	617	153,0	612	152,8	608	152,6	600	152,2	594	151,9	540	149,2	446	144,8	350	140,6	360	141,0	405	143,0	425	143,9
135	594	151,9	602	152,3	608	152,6	615	152,9	626	153,5	624	153,4	635	154,0	635	154,0	631	153,7	633	153,8	630	153,7	630	153,7	614	152,9	601	152,2	570	150,7	508	147,7	458	145,4	473	146,0	483	146,5
125	596	152,0	599	152,1	607	152,5	618	153,1	634	153,9	634	153,9	643	154,4	643	154,4	638	154,1	643	154,4	640	154,2	632	153,8	632	153,8	617	153,0	595	151,9	560	150,2	515	148,0	504	147,5	516	148,1
115	583	151,3	589	151,6	598	152,1	619	153,1	642	154,3	645	154,5	648	154,6	650	154,7	645	154,5	651	154,8	645	154,5	642	154,3	635	154,0	622	153,3	606	152,5	575	150,9	537	149,1	529	148,7	534	148,9
105	571	150,7	577	151,0	599	152,1	630	153,7	653	154,9	650	154,7	652	154,8	652	154,8	648	154,6	648	154,6	649	154,7	639	154,2	637	154,1	626	153,5	612	152,8	582	151,3	551	149,7	542	149,3	557	150,0
95	556	150,0	560	150,2	614	152,9	646	154,5	657	155,1	654	154,9	655	155,0	650	154,7	640	154,2	646	154,5	642	154,3	645	154,5	630	153,7	624	153,4	609	152,6	581	151,2	554	149,9	551	149,7	571	150,7
85	529	148,7	561	150,2	632	153,8	659	155,2	663	155,4	654	154,9	653	154,9	646	154,5	639	154,2	644	154,4	639	154,2	638	154,1	630	153,7	620	153,2	603	152,3	583	151,3	552	149,8	557	150,0	574	150,9
75			592	151,8	649	154,7	663	155,4	665	155,5	652	154,8	647	154,6	638	154,0					634	153,9	632	153,8	629	153,6	617	153,0	606	152,5	576	151,0	551	149,7					579	151,1
65			632	153,8	663	155,4	667	156,1	658	155,1	647	154,6	640	154,2							623	153,3	627	153,5	619	153,1	615	152,9	595	151,9	564	150,4								
55			654	154,9	667	155,6	667	156,1	650	154,7	639	154,2	630	153,7							622	153,3	625	153,4	621	153,2	610	152,7	589	151,6	544	149,4								
45			666	155,6	669	155,7	665	156,0	642	154,3	637	154,1									623	153,3	621	153,2	616	153,0	604	152,4	571	150,7								
35			672	155,9	667	155,6	658	155,1	639	154,2	622	153,3									625	153,4	627	153,5	611	152,7	588	151,6	524	148,4								
25			672	155,9	661	155,3	648	154,6	629	153,6											627	153,5	621	153,2	600	152,2	564	150,4										
15			670	155,8	654	154,9	645	154,5	617	153,0											623	153,3	614	152,9	580	151,2												
5					643	154,4																																



TUBE N° 76 (H.II)

A / B	40		50		60		70		[illegible]		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145			480	149,5	485	150,0	503	150,8	517	151,5	528	151,6	517	151,5	502	150,8	493	150,3	485	150,0	484	149,9	485	150,0	451	148,4													
135	516	151,5	521	151,7	526	152,0	536	152,5	553	153,4	558	153,7	549	153,2	540	152,8	540	152,8	541	152,8	543	152,9	540	152,8	530	152,2	490	150,2	432	147,6								
125	516	151,5	518	151,5	522	151,8	542	152,8	563	153,9	570	154,3	564	154,0	556	153,6	555	153,5	555	153,5	544	153,0	557	153,6	549	153,2	520	151,7	492	150,3	428	147,4	402	146,3	400	146,2	426	147,3
115	504	150,9	510	151,2	522	151,8	557	153,6	572	154,4	578	154,8	566	154,1	561	153,8	559	153,7	555	153,5	557	153,6	565	154,0	557	153,6	529	152,1	508	151,1	465	149,0	431	147,5	429	147,4	452	148,4
105	484	149,9	502	150,8	527	152,1	566	154,1	576	154,7	579	154,8	565	154,0	567	154,1	562	153,9	558	153,7	560	153,8	568	154,2	553	153,4	538	152,6	519	151,6	483	149,9	453	148,5	451	148,4	468	149,2
95	472	149,4	498	150,6	535	152,5	570	154,3	580	154,9	588	155,3	570	154,3	562	153,9	559	153,7	554	153,5	558	153,7	565	154,0	558	153,7	533	152,4	520	151,7	485	150,0	462	148,9	470	149,3	482	149,8
85	452	148,4	512	151,3	562	153,9	580	154,9	590	155,4	585	155,1	564	154,0	557	153,6	553	153,4	548	153,2	560	153,8	558	153,7	550	153,3	530	152,2	519	151,6	482	149,8	467	149,1	475	149,5	497	150,5
75			542	152,8	574	154,5	588	155,3	587	155,2	582	155,0	558	153,7	548	153,2					553	153,4	557	153,6	543	152,9	530	152,2	509	151,1	478	149,7	468	149,2					500	150,7
65			568	154,2	576	154,6	586	155,2	585	155,1	575	154,6	548	153,2							548	153,2	555	153,5	540	152,8	526	152,0	504	150,9	472	149,4								
55			581	154,9	583	155,0	582	155,0	580	154,9	563	153,9	509	151,1							545	153,0	555	153,5	535	152,5	519	151,6	496	150,5	447	148,2								
45			587	155,2	582	155,0	579	154,8	567	154,1	550	153,3									544	153,0	552	153,4	533	152,4	513	151,3	475	149,5								
35			587	155,2	575	154,5	568	154,2	562	153,9											548	153,2	551	153,3	522	151,8	498	150,6	420	147,0								
25			582	155,0	570	154,3	560	153,8													546	153,1	546	153,1	509	151,1	467	149,2										
15			578	154,8	564	154,0	554	153,5													548	153,2	535	152,5	484	149,9	403	146,3										
5																																						

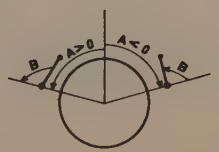
A / B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	504	150,9	505	150,9	504	150,9	509	151,1	519	151,6	532	152,3	541	152,8	535	152,5	529	152,2	515	151,4	516	151,5	507	151,0	486	150,0	401	146,2										
135	514	151,4	515	151,4	515	151,4	520	151,7	532	152,3	548	153,2	557	153,6	552	153,4	550	153,3	540	152,8	530	152,2	538	152,7	526	152,0	499	150,6	450	148,3								
125	512	151,3	512	151,3	512	151,3	526	152,0	541	152,8	557	153,6	565	154,0	563	153,9	557	153,6	552	153,4	547	153,1	544	153,0	542	152,8	515	151,4	491	150,2	445	148,1	415	146,8	410	146,6	420	147,0
115	502	150,8	498	150,6	508	151,1	531	152,3	548	153,2	565	154,0	570	154,3	569	154,3	559	153,7	553	153,4	543	152,9	550	153,3	549	153,2	525	152,0	506	151,0	469	149,2	444	148,1	434	147,6	451	148,4
105	481	149,8	491	150,2	516	151,5	543	152,9	560	153,8	570	154,3	573	154,5	564	154,0	557	153,6	556	153,6	552	153,4	557	153,6	551	153,3	521	151,8	511	151,2	484	149,9	458	148,7	452	148,4	465	149,0
95	461	148,8	488	150,1	530	152,2	553	153,4	566	154,1	572	154,4	573	154,5	565	154,0	557	153,6	550	153,3	548	153,2	553	153,4	550	153,3	521	151,8	514	151,4	485	149,9	469	149,2	468	149,2	485	149,9
85	434	147,6	506	151,0	548	153,2	566	154,1	569	154,3	572	154,4	568	154,2	558	153,7	552	153,4	545	153,0	548	153,2	543	152,9	547	153,1	518	151,6	513	151,3	480	149,8	467	149,1	478	149,7	492	150,3
75			536	152,5	562	153,9	570	154,3	571	154,4	570	154,3	558	153,7	546	153,1					542	152,8	547	153,1	546	153,1	517	151,6	509	151,1	475	149,5	472	149,4					499	150,6
65			561	153,8	568	154,2	568	154,2	566	154,1	562	153,9	548	153,2							538	152,7	540	152,8	541	152,8	509	151,1	500	150,7	472	149,4								
55			564	154,0	568	154,2	561	153,8	558	153,7	555	153,5									533	152,4	538	152,7	543	152,9	503	150,8	488	150,1										
45			575	154,6	570	154,3	555	153,5	548	153,2	540	152,8									532	152,3	538	152,7	534	152,4	490	150,2	465	149,0									
35			575	154,6	562	153,9	550	153,3	542	152,8											531	152,3	538	152,7	524	151,9	471	149,3										
25			575	154,6	553	153,4	538	152,7	530	152,2											532	152,3	526	152,0	504	150,9	447	148,2										
15			570	154,3	543	152,9	532	152,3													529	152,1	514	151,4	486	150,0												
5																																						



TUBE N° 78 (G.II)

A / B	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	468	149,2	475	149,5	481	149,8	502	150,7	510	151,2	517	151,5	508	151,1	502	150,8	498	150,6	487	150,0	483	149,9	470	149,3	434	147,6												
135	514	151,4	510	151,2	525	152,0	535	152,5	543	152,9	548	153,2	542	152,9	544	153,0	540	152,8	539	152,7	539	152,7	534	152,4	517	151,5	496	150,5	432	147,6								
125	510	151,2	517	151,5	521	151,7	543	152,9	553	153,4	558	153,7	556	153,6	552	153,4	551	153,3	552	153,4	549	153,2	547	153,1	536	152,5	526	152,0	492	150,3	432	147,6			400	146,2	432	147,6
115	504	150,9	506	151,0	527	152,1	549	153,2	556	153,6	566	154,1	560	153,8	558	153,7	558	153,7	560	153,8	553	153,4	550	153,3	541	152,8	525	152,0	506	151,0	463	148,9	427	147,3	428	147,4	460	148,8
105	490	150,2	495	150,4	528	152,1	558	153,7	565	154,0	571	154,4	566	154,1	564	154,0	561	153,8	560	153,8	559	153,7	554	153,5	544	153,0	535	152,5	514	151,4	469	149,2	444	148,1	455	148,6	483	149,9
95	462	148,9	500	150,7	547	153,1	566	154,1	568	154,2	570	154,3	565	154,0	560	153,8	561	153,8	557	153,6	553	153,4	552	153,4	544	153,0	538	152,7	517	151,5	479	149,7	458	148,0	468	149,2	497	150,5
85	447	148,2	518	151,6	562	153,9	568	154,2	572	154,4	572	154,4	562	153,2	557	153,6	556	153,6	552	153,4	548	153,2	551	153,3	539	152,7	532	152,3	514	151,4	473	149,4	464	149,0	478	149,7	502	150,8
75			542	152,8	568	154,2	576	154,6	572	154,4	566	154,1	557	153,6	544	153,0					544	153,0	550	153,3	531	152,3	527	152,1	510	151,2	475	149,5	459	148,7					511	151,2
65			565	154,0	575	154,6	577	154,7	568	154,2	561	153,8	547	153,1							544	153,0	542	152,8	536	152,5	526	152,0	499	150,6	464	149,0							
55			572	154,4	578	154,8	572	154,4	560	153,8	550	153,3	540	152,8							536	152,5	542	152,8	531	152,3	518	151,6	494	150,4	404	146,4							
45			579	154,8	579	154,8	567	154,2	554	153,5	540	152,8									539	152,7	538	152,7	531	152,3	514	151,4	473	149,4								
35			579	154,8	572	154,4	555	153,5	546	153,1											541	152,8	538	152,7	525	152,0	497	150,5	422	147,1								
25			578	154,8	562	153,9	545	153,0	539	152,7											538	152,7	537	152,6	510	151,2	468	149,2										
15			572	154,4	554	153,5	544	153,0													537	152,6	520	151,7	488	150,1	407	146,5										
5																									468	149,2												

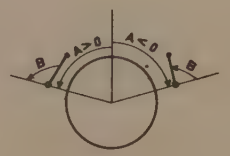
A / B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	515	151,4	511	151,2	520	151,7	532	152,3	533	152,4	540	152,8	549	153,2	548	153,2	536	152,5	533	152,4	525	152,0	501	151,7	494	150,4	431	147,5										
135	521	151,7	524	151,9	534	152,4	544	153,0	550	153,3	559	153,7	563	153,9	563	153,9	555	153,5	548	153,2	546	153,1	545	153,0	538	152,6	512	151,3	475	149,5								
125	517	151,5	518	151,6	531	152,3	544	153,0	556	153,6	569	154,3	569	154,3	573	154,1	566	154,1	560	153,8	559	153,7	556	153,6	554	153,5	528	152,1	510	151,2	462	148,9	424	147,2	421	147,0	432	147,6
115	497	150,5	505	150,9	530	152,2	552	153,4	568	154,2	580	154,9	580	154,9	581	155,0	573	154,5	571	154,4	566	154,1	562	153,9	562	153,9	544	153,0	522	151,8	483	149,9	453	148,5	448	148,3	455	148,6
105	487	150,0	497	150,5	528	152,1	562	153,9	576	154,6	583	155,0	586	155,2	580	154,9	568	154,2	570	154,3	560	153,8	565	154,0	562	153,9	543	152,9	526	152,0	488	150,1	469	149,2	469	149,2	475	149,5
95	464	149,0	490	150,2	548	153,2	572	154,4	583	155,0	588	155,3	585	155,1	577	154,7	565	154,0	564	154,0	564	154,0	564	154,0	555	153,5	547	153,1	523	151,9	495	150,4	475	149,5	480	149,7	488	150,1
85	440	147,9	507	151,0	572	154,4	582	155,0	587	155,2	584	154,1	577	154,7	570	154,3	562	153,9	560	153,8	560	153,8	563	153,9	558	153,7	542	152,9	521	151,8	490	150,2	483	149,9	489	150,2	494	150,4
75			537	152,6	593	155,6	591	155,5	585	155,1	577	154,7	573	154,5							554	153,5	552	153,4	552	153,4	539	152,7	521	151,8	490	150,2	477	149,6			499	150,6
65			571	154,4	593	155,6	586	155,2	580	154,9	573	154,5	566	154,1							549	153,2	553	153,4	547	153,1	535	152,5	511	151,2	475	149,5							
55			588	155,3	596	155,7	582	155,0	573	154,5	563	153,9									546	153,1	555	153,5	542	152,9	531	152,3	502	150,8								
45			594	155,6	594	155,6	575	154,6	567	154,1	556	153,6									547	153,1	548	153,2	540	152,8	526	152,0	476	149,5								
35			598	155,8	592	155,5	570	154,3	560	153,8											546	153,1	547	153,1	532	152,3	503	150,8										
25			595	155,7	582	155,0	560	153,8	550	153,3											541	152,8	542	142,9	512	151,3												
15			592	155,5	568	154,2	555	153,5													543	152,9	526	152,0	492	150,3												
5																																						



TUBE N° 85 (W.I)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	454	145,2	460	145,5	476	146,2	486	146,7	498	147,2	503	147,4	502	147,4	501	147,4	492	146,9	488	146,7	487	146,7	476	146,2	455	145,2	339	140,1	140	132,4	124	131,9	182	134,0	249	136,5	283	137,9
135	496	147,1	503	147,4	513	147,0	522	148,4	532	148,8	536	149,0	534	148,9	537	149,1	537	149,1	526	148,5	532	148,8	529	148,7	521	148,3	506	147,6	462	145,5	363	141,2	337	140,1	352	140,7	367	141,3
125	497	147,2	504	147,5	515	148,0	527	148,6	542	149,3	550	149,7	550	149,7	548	149,6	549	149,7	549	149,7	551	149,7	544	149,4	529	148,7	526	148,5	504	147,5	449	145,0	402	142,9	395	142,5	408	143,1
115	488	146,7	496	147,1	511	147,8	535	149,0	546	149,5	560	150,2	556	150,0	561	150,2	558	150,1	550	149,7	558	150,1	552	149,8	536	149,0	538	149,1	517	148,1	479	146,3	434	144,3	420	143,6	437	144,4
105	476	146,2	479	146,3	516	148,1	543	149,4	559	150,1	564	150,4	562	150,3	566	150,5	554	149,9	555	149,9	558	150,1	546	149,5	542	149,3	541	149,3	525	148,5	488	146,7	457	145,3	443	144,7	458	145,4
95	456	145,3	467	145,8	524	148,4	557	150,0	566	150,5	567	150,5	566	150,5	559	150,1	553	149,8	551	149,7	553	149,8	548	149,6	541	149,3	539	149,2	521	148,3	495	147,1	463	145,6	460	145,5	475	146,1
85	437	144,4	468	145,8	528	148,6	565	150,4	570	150,7	569	150,6	564	150,4	553	149,8	548	149,6	543	149,4	549	149,7	548	149,6	538	149,1	536	149,0	522	148,4	488	146,7	464	145,6	469	145,9	481	146,4
75			494	147,0	542	149,3	572	150,8	569	150,6	562	150,3	555	149,9	548	149,6					540	149,2	540	149,2	532	148,8	532	148,8	518	148,2	485	146,6	460	145,5			488	146,7		
65			537	149,1	560	150,2	579	151,0	566	150,5	558	150,1	549	149,7							536	149,0	539	149,2	534	148,9	530	148,7	511	147,8	482	146,5							
55			559	150,1	572	150,8	577	151,0	563	150,3	544	149,4	539	149,2							530	148,7	536	149,0	528	148,6	526	148,5	505	147,5	464	145,6							
45			569	150,6	578	151,1	575	150,9	551	149,7	543	149,4									532	148,8	537	149,1	523	148,4	519	148,2	490	146,8									
35			578	151,1	571	150,7	561	150,2	547	149,6											530	148,7	536	149,0	526	148,5	510	147,8	457	145,3									
25			580	151,2	566	150,5	553	149,8	537	149,1											534	148,9	534	148,9	515	148,0	482	146,5											
15			575	150,9	558	150,1	542	149,3													532	148,8	530	148,7	496	147,1	456	145,3											
5					545	149,5																			476	146,0													

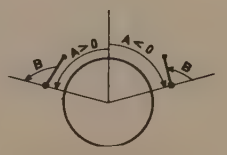
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	508	147,7	512	147,9	515	148,0	518	148,2	528	148,6	538	148,6	539	149,2	538	149,1	545	149,5	529	148,7	520	148,3	512	147,9	507	147,6	468	145,8	341	140,2	240	136,2	264	137,1	305	138,7	309	138,9
135	519	148,2	517	148,1	521	148,3	529	148,7	537	149,1	549	149,7	551	149,7	557	150,0	560	150,2	550	149,7	537	149,1	537	149,1	539	149,2	521	148,3	485	146,6	409	143,2	366	141,3	374	141,6	392	142,4
125	516	148,1	518	148,2	517	148,1	535	149,0	546	149,5	557	150,0	562	150,3	567	150,5	568	150,6	561	150,2	549	149,7	542	149,3	549	149,7	542	149,3	512	147,9	468	145,8	424	143,8	410	143,2	423	143,8
115	505	147,5	507	147,6	512	147,9	534	148,9	554	149,9	565	150,4	566	150,5	570	150,7	572	150,8	560	150,2	552	149,8	544	149,4	554	149,9	551	149,7	519	148,2	486	146,7	453	145,1	437	144,4	455	145,2
105	493	147,0	492	146,9	515	148,0	545	149,5	559	150,1	571	150,7	567	150,5	574	150,9	571	150,7	561	150,2	552	149,8	553	149,8	559	150,1	550	149,7	522	148,4	497	147,2	463	145,6	456	145,3	473	146,0
95	472	146,0	477	146,2	524	148,4	558	150,1	569	150,6	572	150,8	570	150,7	572	150,8	568	150,6	556	150,0	553	149,8	547	149,6	553	149,8	552	149,8	516	148,1	497	147,2	467	145,8	472	146,0	488	146,7
85	446	143,0	478	146,3	546	149,5	569	150,6	576	151,0	571	150,7	566	150,0	567	150,5	565	150,4	549	149,7	546	149,5	542	149,3	550	149,7	548	149,6	515	148,0	488	146,7	465	145,7	475	146,1	499	147,3
75			500	147,3	464	150,4	575	150,9	578	151,1	570	150,7	561	150,2	565	150,4					544	149,4	541	149,3	539	149,2	543	149,4	507	147,6	489	146,8	457	145,3							
65			547	149,6	576	151,0	581	151,2	572	150,8	566	150,5	554	149,9							531	148,8	541	149,3	548	149,6	538	149,1	498	147,2	486	146,7							
55			570	150,7	578	151,1	575	150,9	565	150,4	556	150,0	548	149,6							527	148,6	540	149,2	541	149,3	538	149,1	495	147,0	467	145,8							
45			578	151,1	581	151,2	572	150,8	563	150,3	551	149,7									532	148,8	537	149,1	540	149,2	532	148,8	478	144,7									
35			579	151,1	577	151,0	566	150,5	554	149,9	538	149,1									528	148,8	537	149,1	538	149,1	516	148,1	452	145,1									
25			583	151,3	573	150,8	556	150,0	550	149,7											530	148,7	538	149,1	523	148,4	492	146,9											
15			579	151,1	565	150,4	549	149,7	540	149,2											527	148,6	532	148,8	502	147,4													
5					557	150,0																																	



TUBE N° 87 (X.I)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	497	147,2	508	147,7	509	147,7	523	148,4	523	148,4	535	149,0	534	148,9	526	148,5	522	148,4	519	148,2	511	147,8	498	147,2	463	145,6	358	141,0	195	134,5	171	133,6	231	135,8	399	142,7	304	138,7
135	526	148,5	527	148,6	538	149,1	550	149,7	552	149,8	559	150,1	558	150,1	554	149,9	552	149,8	556	150,0	552	149,8	545	149,5	538	149,1	521	148,3	475	146,1	383	142,0	365	141,2	387	142,2	392	142,4
125	525	148,5	527	148,6	540	149,2	554	149,9	563	150,3	570	150,7	570	150,7	566	150,5	568	150,6	569	150,6	565	150,4	557	150,0	553	149,8	537	149,1	517	148,1	473	146,0	423	143,8	421	143,7	428	144,0
115	517	148,1	518	148,2	534	148,9	559	150,1	566	150,5	577	151,0	575	150,9	570	140,7	576	151,0	572	150,8	572	150,8	564	150,4	552	149,8	544	149,4	526	148,5	501	147,4	459	145,4	448	144,9	458	145,4
105	504	147,5	507	147,6	535	149,0	558	150,1	579	151,1	583	151,3	581	150,2	573	150,8	577	151,0	574	150,9	571	150,7	558	150,6	561	150,2	550	149,7	535	149,0	508	147,7	473	146,0	465	145,7	475	146,1
95	487	146,7	495	147,1	543	149,4	574	150,9	583	151,3	586	151,5	580	150,2	577	151,0	574	150,9	572	150,8	567	150,8	567	150,5	560	150,2	552	149,8	529	148,7	512	147,9	486	146,7	482	146,5	495	147,1
85	459	145,4	496	147,1	564	150,4	578	151,1	589	151,6	587	151,5	582	151,3	574	150,9	566	150,5	568	150,6	565	150,4	560	150,2	557	150,0	544	149,4	533	148,9	509	147,7	483	146,5	483	146,5	501	147,4
75			526	148,5	578	151,1	586	151,5	588	151,6	582	151,3	573	150,8	565	150,4					563	150,3	558	150,1	554	149,9	542	149,3	529	148,7	507	147,6	478	146,3					502	147,4
65			558	150,1	590	151,7	589	151,6	589	151,6	574	150,9	569	150,6							554	149,9	553	149,8	551	149,7	542	149,3	521	148,3	499	147,3	289	138,1						
55			577	151,0	596	152,0	589	151,6	589	151,6	566	150,5	558	150,1							547	149,6	551	149,7	547	149,6	538	149,1	516	148,1	487	146,7								
45			592	151,8	597	152,0	583	151,3	582	151,3	560	150,2									548	149,6	546	149,5	544	149,4	533	148,9	505	147,5									
35			599	152,1	595	151,9	574	150,9	569	150,6											543	149,4	547	149,6	541	149,3	526	148,5	478	146,3									
25			597	152,0	592	151,8	569	150,6	562	150,3											545	149,5	546	149,5	433	148,9	503	147,4											
15			592	151,8	581	151,2	558	150,1													547	149,6	541	149,3	513	147,9	472	146,0											
5					573	150,8																			489	146,8													

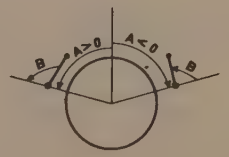
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	520	148,3	514	147,5	514	147,5	520	148,3	532	148,8	537	149,1	542	149,3	542	149,3	532	148,8	528	148,6	531	148,8	518	148,2	521	148,3	474	146,1	370	141,5	286	138,0	294	138,3	328	139,7	345	140,4
135	525	148,5	522	148,4	523	148,4	528	148,6	541	149,3	547	149,6	547	149,6	550	149,7	547	149,6	546	149,5	548	149,6	540	149,2	551	149,7	550	149,7	506	147,6	440	144,5	389	142,3	395	142,5	404	142,9
125	515	148,0	518	148,2	515	148,0	527	148,6	549	149,7	554	149,9	560	150,2	556	150,0	552	149,8	558	150,1	555	149,9	549	149,7	564	150,4	559	150,1	526	148,5	489	146,8	449	145,0	426	143,9	435	144,3
115	503	147,4	502	147,4	507	147,6	531	148,8	553	149,8	563	150,3	561	150,2	568	150,6	563	150,3	565	150,4	563	150,3	550	149,7	570	150,7	558	150,1	537	149,1	506	147,6	468	145,8	455	145,2	461	145,5
105	488	146,7	495	147,1	512	147,9	549	149,7	564	150,4	571	150,7	571	150,7	570	150,7	560	150,2	566	150,5	564	150,4	552	149,8	574	140,9	556	150,0	541	149,3	515	148,0	480	146,4	468	145,8	479	146,3
95	472	146,0	476	146,2	516	148,1	559	150,1	575	150,9	573	150,8	569	150,6	563	150,3	560	150,2	556	150,0	564	150,4	552	149,8	568	150,6	555	149,9	543	149,4	508	147,7	483	146,5	480	146,4	491	146,9
85	447	144,9	478	146,3	540	149,2	574	150,9	576	151,0	574	150,9	562	150,3	560	150,2	558	150,1	554	149,9	561	150,2	551	149,7	568	150,6	550	149,7	538	149,1	514	148,0	485	146,6	487	146,7	495	147,1
75			507	147,6	555	149,9	577	151,0	575	150,9	571	150,7	564	150,4	555	149,9					553	149,8	543	149,4	564	150,4	548	149,6	534	148,9	508	147,7	480	146,4						
65			548	149,6	571	150,7	581	151,2	572	150,8	568	150,6	557	150,0							543	149,4	546	149,5	560	150,2	544	149,4	531	148,8	502	147,4								
55			569	150,6	575	150,9	578	151,1	568	150,6	560	150,2	548	149,6							538	149,1	550	149,7	557	150,0	541	149,3	525	148,5	477	146,2								
45			586	151,5	574	150,9	575	150,9	563	150,3	549	149,7									543	149,4	550	149,7	558	150,1	536	149,0	503	147,4									
35			583	151,3	579	151,1	567	150,5	556	150,0	542	149,3									539	149,2	548	149,6	549	149,7	524	148,4	470	145,9									
25			586	151,5	567	150,5	558	150,1	545	149,5											538	149,1	551	149,7	537	149,1	498	147,2											
15			585	151,4	560	150,2	549	149,7	542	149,3											540	149,2	543	149,4	515	148,0													
5					556	150,0																																	



TUBE N° 96 (C.II)

B \ A	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145	405	146,5	407	146,5	413	146,7	433	147,6	446	148,2	444	148,1	443	148,0	428	147,4	427	147,3	427	147,3	415	146,8																
135	444	148,1	443	148,0	453	148,5	465	149,0	473	149,4	476	149,5	473	149,4	475	149,5	473	149,4	472	149,4	472	149,4	464	149,0	451	148,4	425	147,2										
125	438	147,8	447	148,2	458	148,7	469	149,2	483	149,9	488	150,1	489	150,2	482	149,8	484	149,9	486	150,0	484	149,9	470	149,3	468	149,2	448	148,2	420	147,0								
115	428	147,4	437	147,8	457	148,7	474	149,5	489	150,1	494	150,4	494	150,4	491	150,2	492	150,3	492	150,3	488	150,1	482	149,8	472	149,4	460	148,8	436	147,7	400	146,2					411	146,6
105	417	146,9	429	147,4	460	148,8	490	150,2	499	150,6	501	150,7	500	150,7	493	150,3	493	150,3	490	150,2	490	150,2	482	149,8	474	149,5	462	148,9	445	148,1	415	146,8					416	146,9
95			419	147,0	474	149,4	495	150,5	499	150,6	507	151,0	497	150,5	491	150,2	493	150,3	488	150,1	488	150,1	480	149,7	475	149,5	463	148,9	446	148,2	414	146,8			407	146,5	439	147,8
85			434	147,6	486	150,0	506	151,0	508	151,1	502	150,8	490	150,2	489	150,2	487	150,1	487	150,1	481	149,8	478	149,7	479	149,7	464	149,0	440	147,9	420	147,0	404	146,4	423	147,1	445	148,1
75			470	149,3	498	150,6	514	151,4	506	151,0	497	150,5	489	150,1	482	149,8					473	149,4	480	149,7	468	149,2	461	148,8	445	148,1	422	147,1	410	146,6			446	148,2
65			490	150,2	507	151,0	510	151,2	504	150,9	492	150,3	476	149,5							476	149,5	475	149,5	467	149,1	460	148,8	436	147,7	422	147,1						
55			504	150,9	517	151,5	506	151,0	493	150,3	483	149,9	442	148,0							473	149,4	474	149,5	464	149,0	453	148,5	434	147,6	423	147,1						
45			511	152,1	507	151,0	499	150,6	485	150,0	471	149,3									473	149,4	472	149,4	457	148,7	446	148,2	430	147,5								
35			510	151,2	506	151,0	490	150,2	479	149,7											473	149,4	470	149,3	457	148,7	442	148,0	427	147,3								
25			510	151,2	491	150,2	480	149,7	473	149,4											472	149,4	468	149,2	447	148,2	438	147,8										
15			503	150,8	484	149,9	481	149,8													472	149,4	460	148,8	440	147,9	430	147,5										
5					476	149,5																			433	147,6												

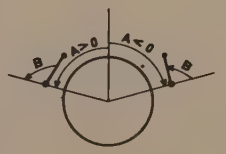
B \ A	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	425	147,2	431	147,5	425	147,2	445	148,1	456	148,6	470	149,3	455	148,6	458	148,7	450	148,3	447	148,2	452	148,4	439	147,9	407	146,5												
135	432	147,5	440	147,9	450	148,3	458	148,7	470	149,3	484	149,9	472	149,4	468	149,2	471	149,3	470	149,3	470	149,3	465	149,0	451	148,4	433	147,6										
125	430	147,4	436	147,7	440	147,9	458	148,7	476	149,5	487	150,1	472	149,4	480	149,7	477	149,6	481	149,8	482	149,9	473	149,4	466	149,1	454	148,5	431	147,5								
115	417	146,9	431	147,5	444	148,1	469	149,2	484	149,9	494	150,4	484	149,9	482	149,8	485	150,0	483	149,9	485	150,0	483	149,9	469	149,2	460	148,8	442	148,0	409	146,6						
105	405	146,5	414	146,8	449	148,4	476	149,5	494	150,4	498	150,6	485	150,0	483	149,9	480	149,7	486	150,0	485	150,0	477	149,6	474	149,5	460	148,8	447	148,2	421	147,0					412	146,7
95			409	146,6	465	149,0	489	150,2	502	150,8	502	150,8	484	149,9	483	149,9	483	149,9	481	149,8	490	150,2	475	149,5	470	149,3	457	148,7	447	148,2	425	147,2			402	146,3	430	147,5
85			428	146,4	479	149,7	500	150,7	500	150,7	495	150,5	481	149,8	482	149,8	479	149,7	475	149,5	482	149,8	475	149,5	460	148,8	461	148,8	445	148,1	425	147,2	404	146,4	413	146,7	439	147,9
75			462	148,9	491	150,2	504	150,9	504	150,9	494	150,4	478	149,7	472	149,4					480	149,7	472	149,4	465	149,0	460	148,8	443	148,0	423	147,1	402	146,3					442	148,0
65			484	149,9	501	150,7	505	150,9	500	150,7	482	149,8	462	148,9							476	149,5	469	149,2	457	148,7	450	148,3	443	148,0	423	147,1						
55			497	152,5	503	150,8	501	150,7	495	150,5	477	149,6									478	149,6	475	149,5	458	148,7	443	148,0	443	148,0	423	147,1						
45			503	150,8	501	150,7	495	150,5	484	149,9	466	149,1									479	149,7	466	149,1	458	148,7	438	147,8	435	147,7								
35			503	150,8	500	150,7	485	150,0	482	149,8											479	149,7	461	148,8	447	148,2	431	147,7										
25			502	150,8	490	150,2	485	150,0	474	149,5											472	149,4	457	148,7	439	147,9												
15			493	150,3	484	149,9	475	149,5													468	149,2	452	148,4	430	147,5												
5																																						



TUBE N° 98 (B.II)

A \ B	40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220	
	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C	N	T° C
145					408	146,6	414	146,8	428	147,4	438	147,8	443	148,0	424	147,2	414	146,8	420	147,0	407	146,5	397	146,1																
135	425	147,2	433	147,6	441	147,9	451	148,4	460	148,8	470	149,3	469	149,2	461	148,8	458	148,7	461	148,8	462	148,9	454	148,5	445	148,1	414	146,8										
125	427	147,3	440	147,9	441	147,9	455	148,6	467	149,1	475	149,5	477	149,6	474	149,5	470	149,3	473	149,4	475	149,5	466	149,1	461	148,8	439	147,9	409	146,6								
115	420	147,0	430	147,5	437	147,7	461	148,8	479	149,7	481	149,8	480	149,7	475	149,5	477	149,6	476	149,5	483	149,9	472	149,4	466	149,1	449	148,3	420	147,0								
105	402	146,3	415	146,8	445	148,1	472	149,4	478	149,7	487	150,1	488	150,1	482	149,8	477	149,6	479	149,7	476	149,5	470	149,3	467	149,1	461	148,8	430	147,5							404	146,4
95			418	146,9	460	148,8	477	149,6	486	150,0	485	150,0	487	150,1	476	149,5	476	149,5	476	149,5	476	149,5	469	149,2	467	149,1	456	148,7	424	147,2							416	146,9
85			440	147,9	472	149,4	485	150,0	490	150,2	485	150,0	485	150,0	470	149,3	465	149,0	476	149,5	473	149,4	468	149,2	464	149,0	452	148,4	425	147,2					400	146,2	416	146,9
75			462	148,9	482	149,9	494	150,4	491	140,2	485	150,0	478	149,7	461	148,8					472	149,4	464	149,0	463	148,9	452	148,4	418	146,9	399	146,1					427	147,3
65			483	149,9	493	150,3	491	150,2	484	149,9	476	149,5	472	149,4							462	148,9	466	149,1	460	148,8	449	148,3	420	147,0	400	146,2						
55			495	150,4	494	150,4	488	150,1	478	149,7	470	149,3	411	146,7							465	149,0	463	148,9	457	148,7	441	147,9	413	146,7	399	146,1						
45			498	150,6	492	150,3	478	149,7	472	149,4	460	148,8									470	149,3	466	148,9	455	148,6	432	147,5	408	146,6								
35			497	150,5	485	150,0	470	149,3	457	148,7											465	149,0	456	148,6	448	148,4	432	147,5										
25			499	150,6	478	149,7	461	148,8	452	148,4											467	149,1	447	148,2	441	147,9	426	147,3										
15			486	150,0	467	149,1	460	148,8													460	148,8	447	148,2	435	147,7	418	146,9										
5																									424	147,2												

A \ B	-40		-50		-60		-70		-80		-90		-100		-110		-120		-130		-140		-150		-160		-170		-180		-190		-200		-210		-220	
145	416	146,9	422	147,1	421	147,0	435	147;7	445	148,1	451	148,4	450	148,3	442	148,0	446	148,2	443	148,0	432	147,5	428	147,4	409	146,6												
135	428	147,4	427	147,3	434	147,6	447	148,2	457	148,7	467	149,1	462	148,9	469	149,2	459	148,3	462	148,5	465	149,0	460	148,8	447	148,2	423	147,1										
125	419	147,0	427	147,3	432	147,5	447	148,2	464	149,0	473	149,4	468	149,2	470	149,3	470	149,3	470	149,3	471	149,3	471	149,4	455	148,6	440	147,9	419	147,0								
115	406	146,5	416	146,9	429	147,4	452	148,4	470	149,3	481	149,8	476	149,5	475	149,5	479	149,7	478	149,7	475	149,5	472	149,4	464	149,0	447	148,2	429	147,4	402	146,3						
105			400	146,2	430	147,5	461	148,8	482	149,8	491	150,2	481	149,8	478	149,7	475	149,5	475	149,5	480	149,7	472	149,4	462	148,9	449	148,3	441	147,9	412	146,7					404	145,4
95					448	148,3	475	149,5	487	150,0	490	150,2	475	149,5	475	149,5	480	149,7	469	149,2	473	149,4	475	149,8	465	149,0	453	148,5	438	147,8	412	146,7					417	146,9
85			408	146,6	465	149,0	487	150,1	490	150,2	487	150,0	475	149,5	468	149,2	466	149,1	466	149,1	470	149,3	473	149,4	462	148,9	449	148,3	434	147,6	412	146,7	402	146,3	426	147,3		
75			440	147,9	482	149,8	491	150,2	487	150,0	482	149,8	465	149,0	462	148,9					470	149,3	470	149,3	458	148,7	443	148,0	437	147,7	412	146,7	404	146,4			431	147,5		
65			470	149,3	490	150,2	492	150,3	481	149,8	476	149,5	464	149,0							462	148,9	465	149,0	452	148,4	442	148,0	427	147,3	413	146,7							
55			486	150,0	488	150,1	487	150,1	476	149,5	467	149,1									464	149,0	467	149,0	450	148,3	438	147,8	427	147,3								
45			497	150,5	491	150,2	480	149,7	470	149,3	460	148,8									464	149,0	461	148,8	445	148,1	430	147,5	431	147,5								
35			495	150,4	488	150,1	472	149,4	464	149,0											464	149,0	460	148,8	440	147,9	430	147,5										
25			495	150,4	474	149,5	462	148,9	455	148,6											464	149,0	450	148,3	432	147,6	425	147,2										
15			485	150,0	466	149,1	458	148,7													459	148,7	445	148,1	425	147,2												
5					461	148,8																																



Annexe VII

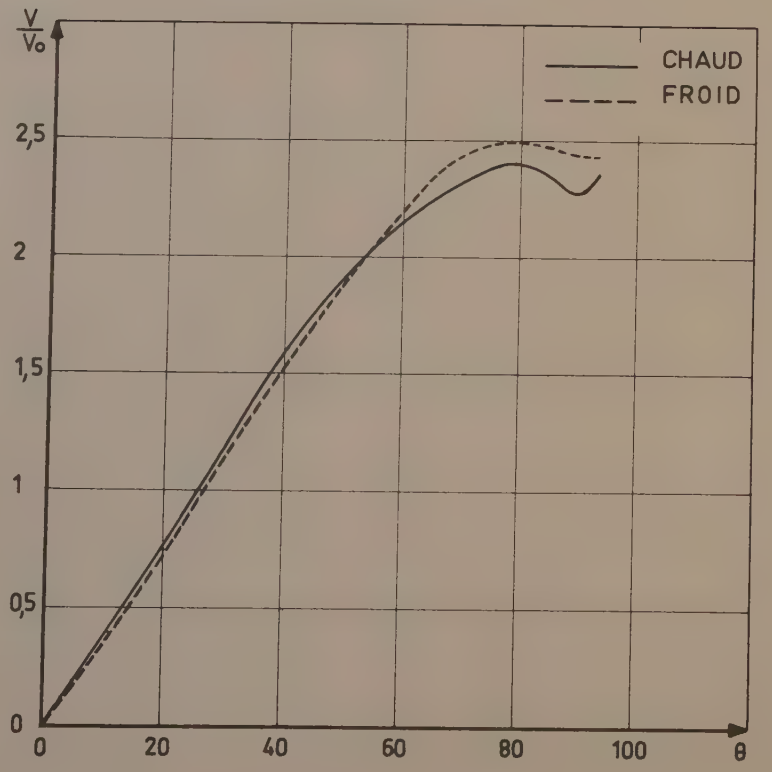
Résultats des calculs de couche limite

RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 1

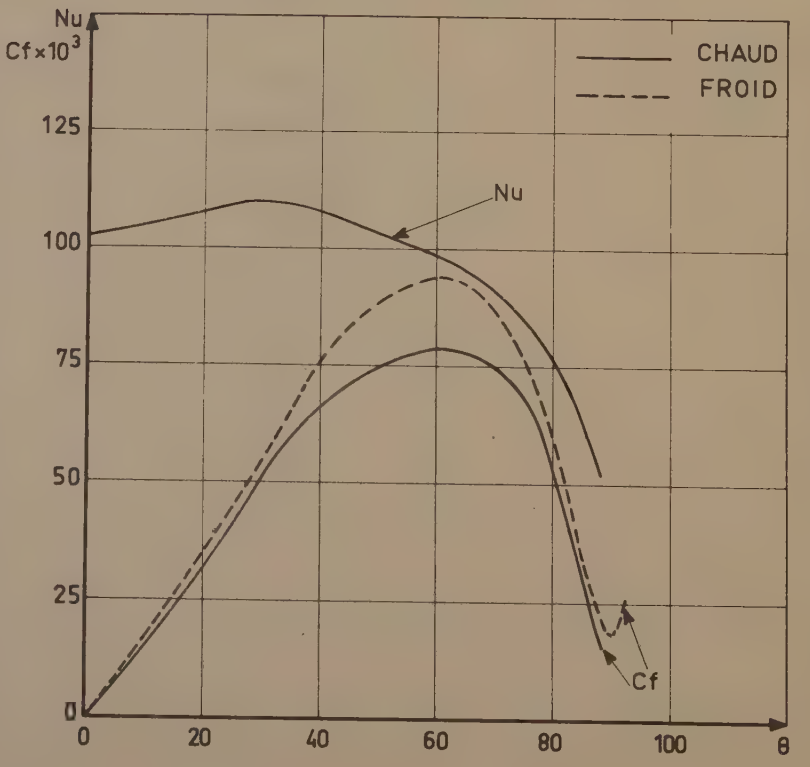
I. COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	3,96	3,92	3,85	3,72	3,48	3,12	2,60	2,10	1,60	1,00	0,50	-0,08	-0,64	-1,16	-1,58	-1,84	-1,89	-1,74	-1,42				
FROID	4,24	4,18	4,10	3,94	3,70	3,36	2,98	2,46	1,84	1,26	0,62	-0,04	-0,62	-1,30	-1,70	-1,98	-2,08	-1,96	-1,70				

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

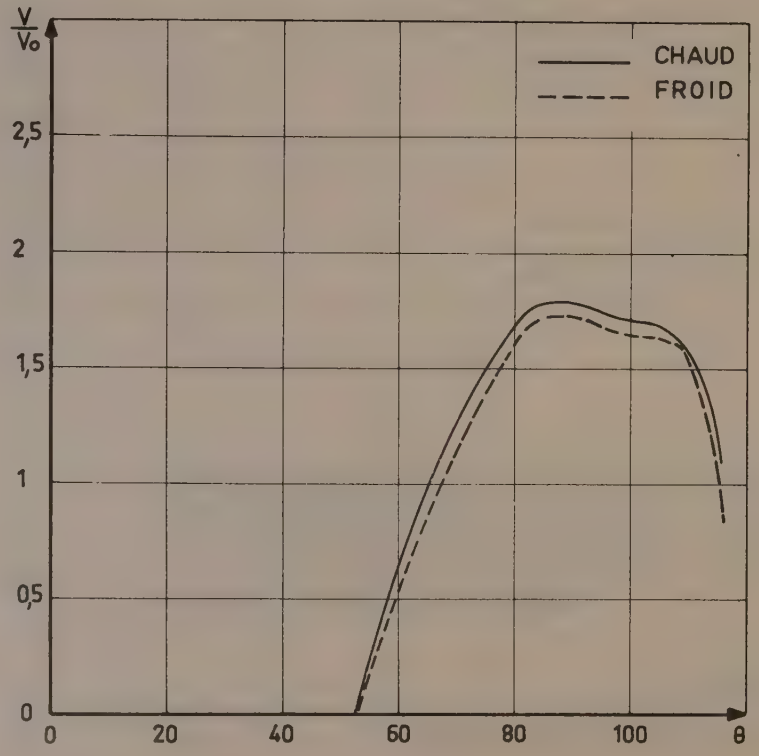


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 2

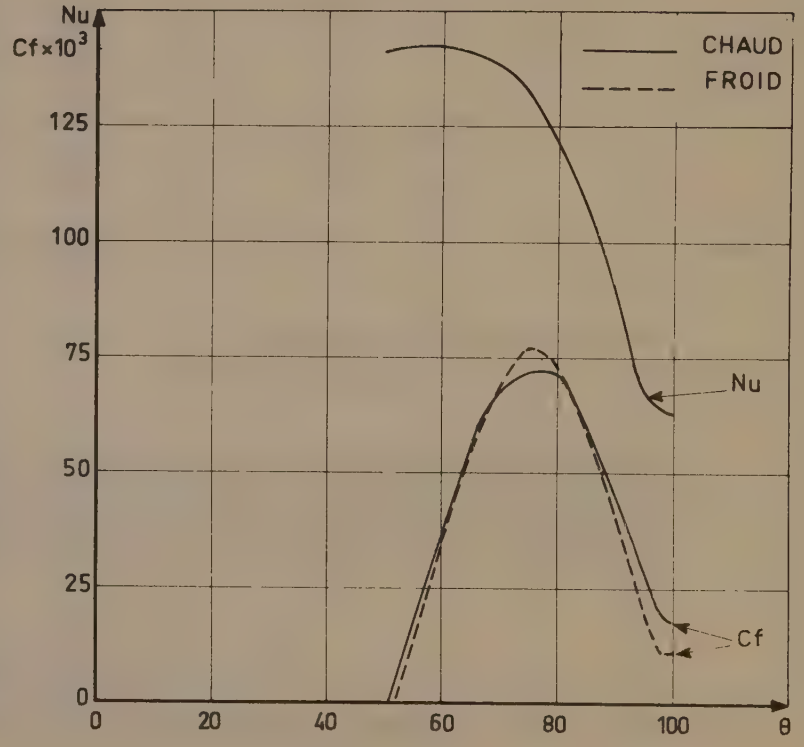
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	-0.80	-0.80	-0.78	-0.68	-0.45	0.00	0.50	1.03	1.51	1.84	1.94	1.88	1.51	1.00	0.35	-0.25	-0.81	-1.20	-1.36	-1.28	-1.10	-0.90	-0.70
FROID	-0,96	-0,95	-0,93	-0,88	-0,69	-0,34	0,17	0,64	1,20	1,55	1,66	1,66	1,38	0,90	0,28	-0,35	-0,84	-1,17	-1,34	-1,28	-1,10	-0,94	-0,76

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT
NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

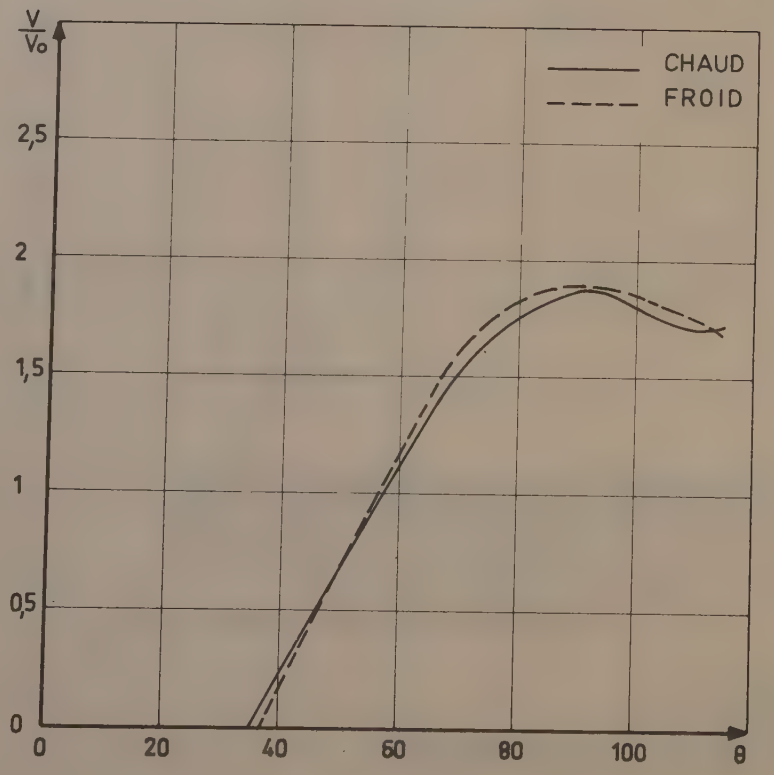


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 3

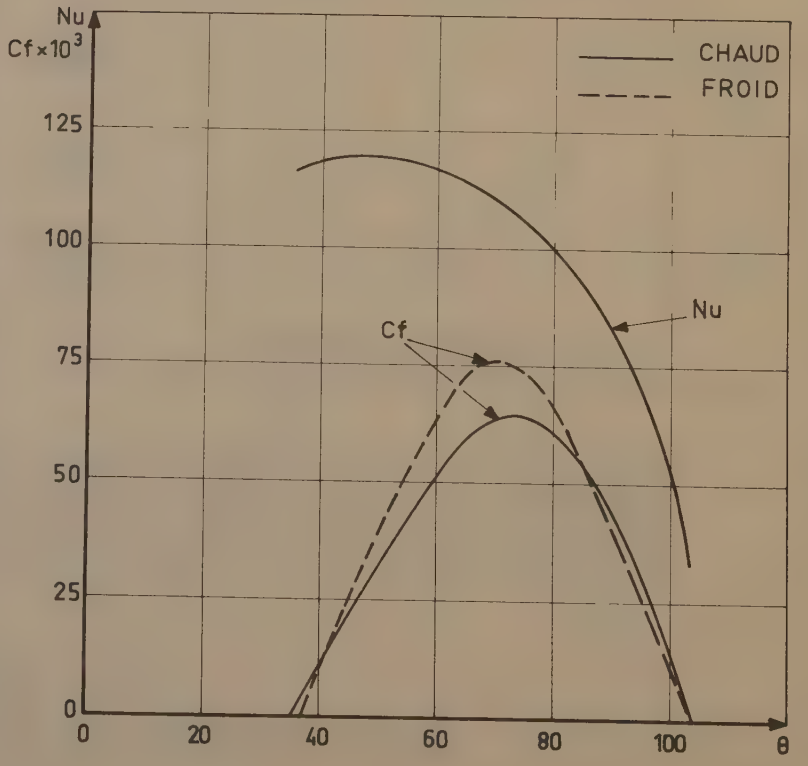
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	0.92	1.04	1.16	1.28	1.40	1.56	1.68	1.74	1.67	1.49	1.26	0.84	0.30	0.20	-0.64	-1.10	-1.48	-1.74	-1.84	-1.74	-1.58	-1.41	1.24
FROID	0,83	0,93	1,10	1,24	1,45	1,72	1,93	1,97	1,90	1,76	1,45	1,07	0,55	-0,03	-0,55	-1,03	-1,41	-1,66	-1,66	-1,55	-1,45	-1,28	-1,10

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

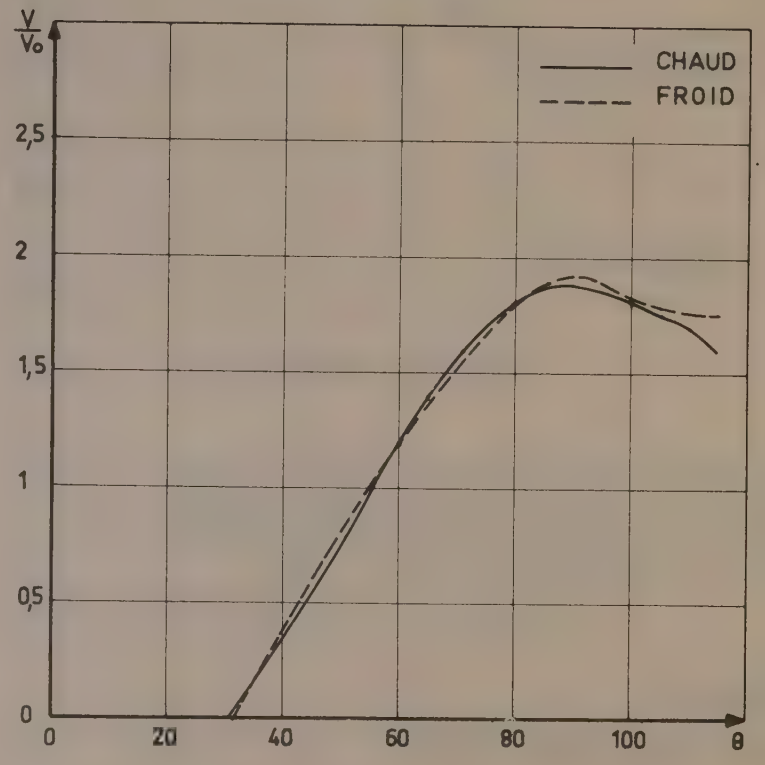


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 4

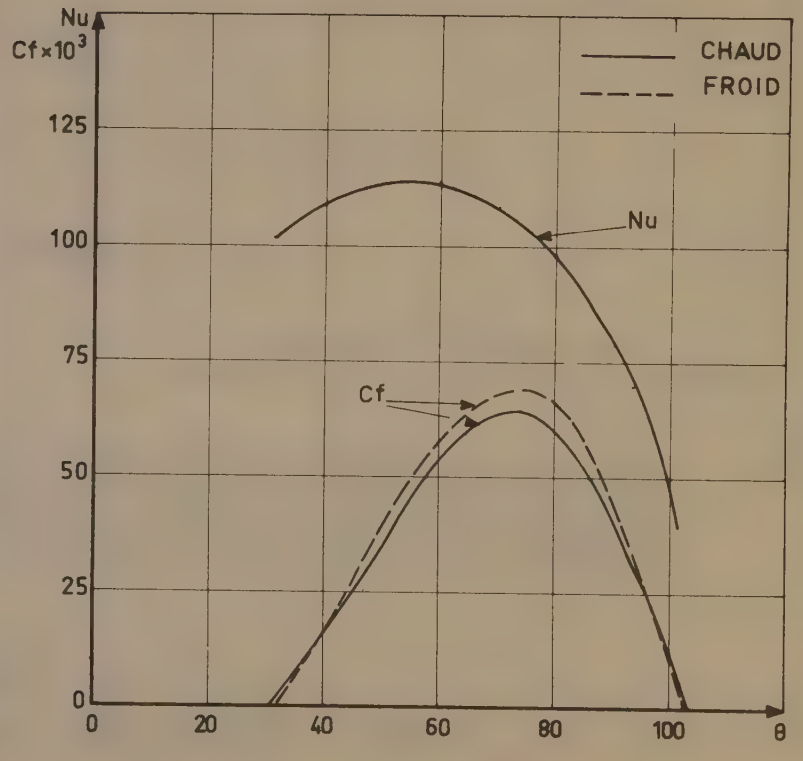
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	1.74	1.74	1.76	1.82	1.92	2.01	2.02	1.96	1.86	1.70	1.44	1.06	0.54	0.03	-0.50	-0.98	-1.30	-1.54	-1.64	-1.55	-1.34	-1.10	-0.90
FROID	1,50	1,51	1,54	1,62	1,74	1,83	1,88	1,88	1,76	1,54	1,24	0,88	0,50	0,00	-0,56	-1,08	-1,40	-1,68	-1,80	-1,76	-1,58	-1,39	-1,20

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

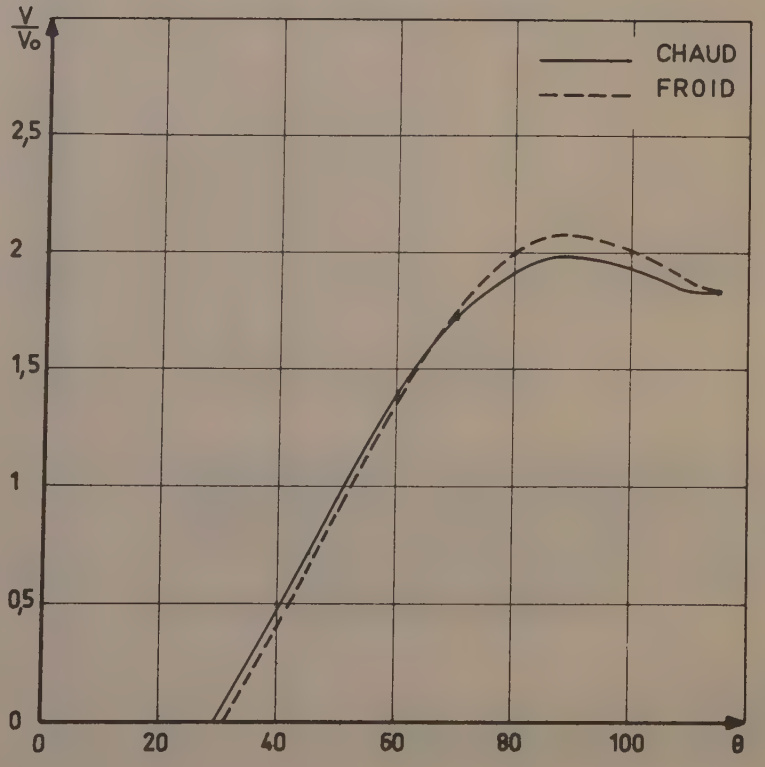


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 5

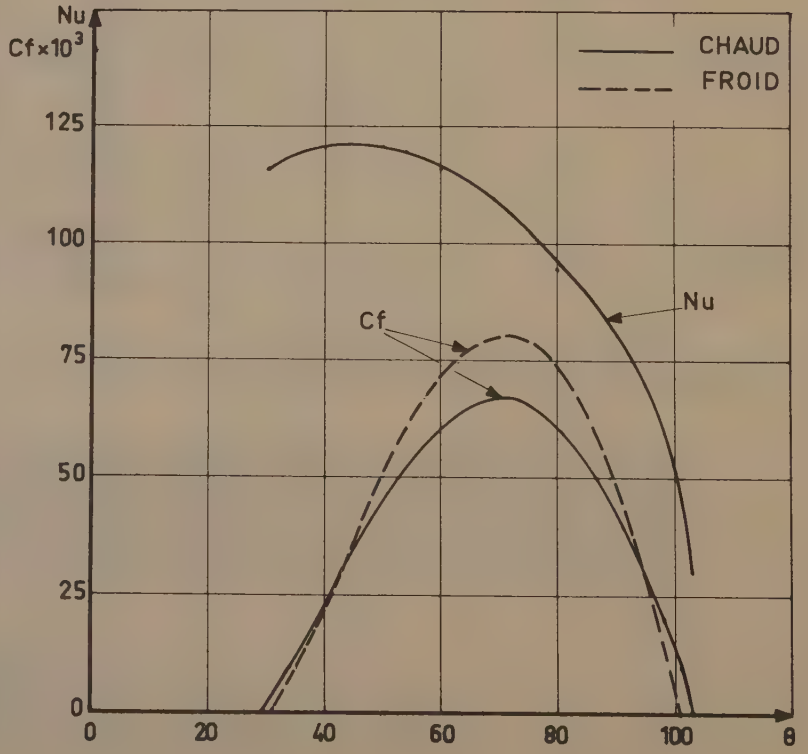
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	2.04	2,12	2.20	2.32	2,42	2.52	2.54	2.44	2.26	1.97	1.60	1.06	0.54	0.02	_0,56	_1.04	_1.20	_1.63	_1.65	_1.52	_1.34	_1.12	_0.88
FROID	2,00	2,06	2,15	2,25	2,38	2,50	2,55	2,50	2,32	2,06	1,72	1,21	0,62	0,00	-0,52	-1,06	-1,48	-1,70	-1,80	-1,72	-1,48	-1,24	-0,97

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT
NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

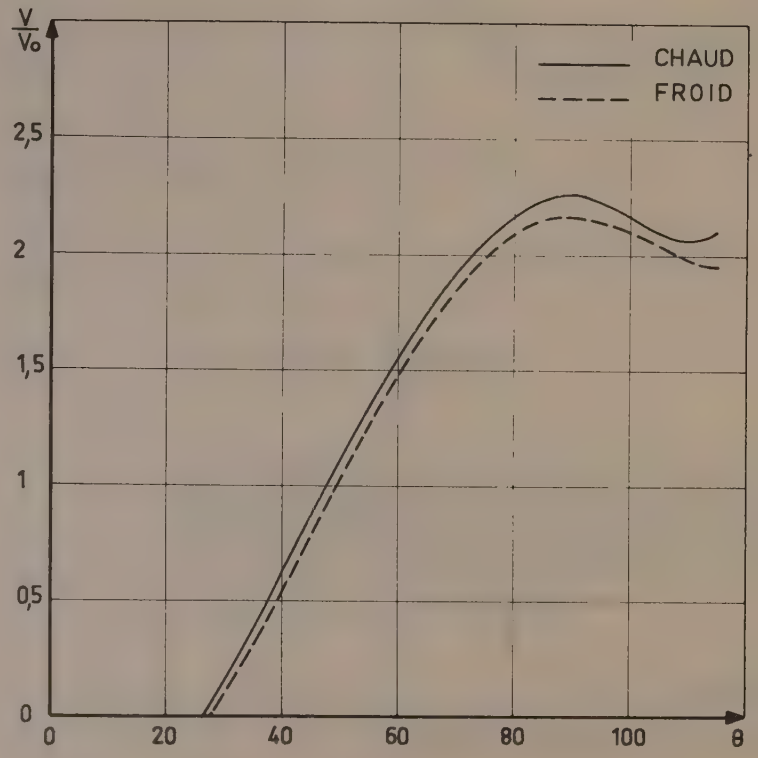


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 6

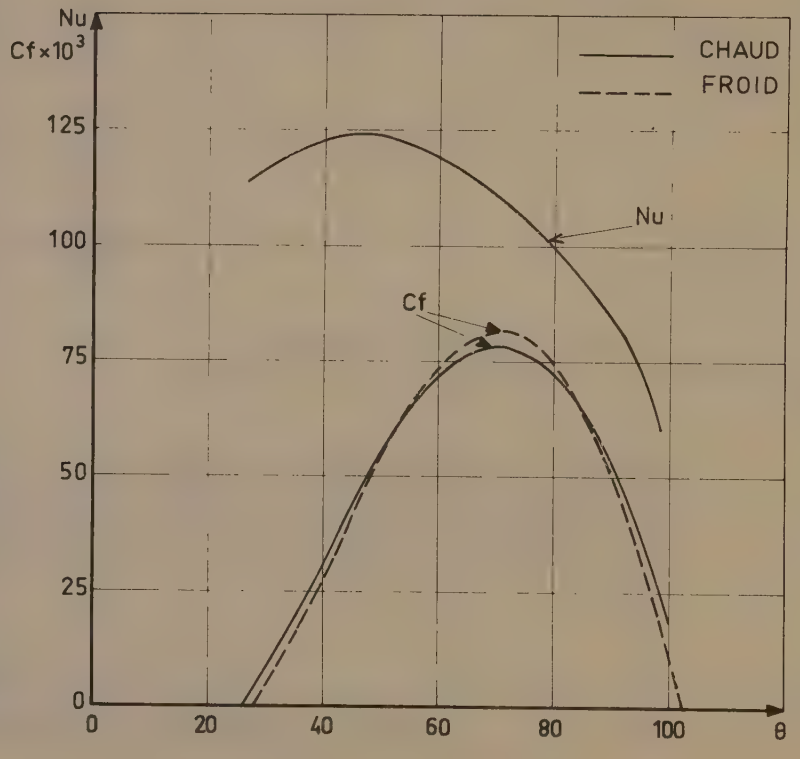
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	2.76	2.76	2.83	2.96	3.07	3.11	3.06	2.96	2.70	2.30	1.74	1.20	0.54	-0.08	-0.78	-1.34	-1.74	-2.04	-2.24	-2.10	-1.80	-1.44	-1.14
FROID	2,37	2,39	2,47	2,60	2,70	2,76	2,73	2,61	2,40	2,14	1,70	1,10	0,49	-0,06	-0,70	-1,28	-1,68	-1,93	-2,00	-1,90	-1,70	-1,46	-1,20

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT
NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

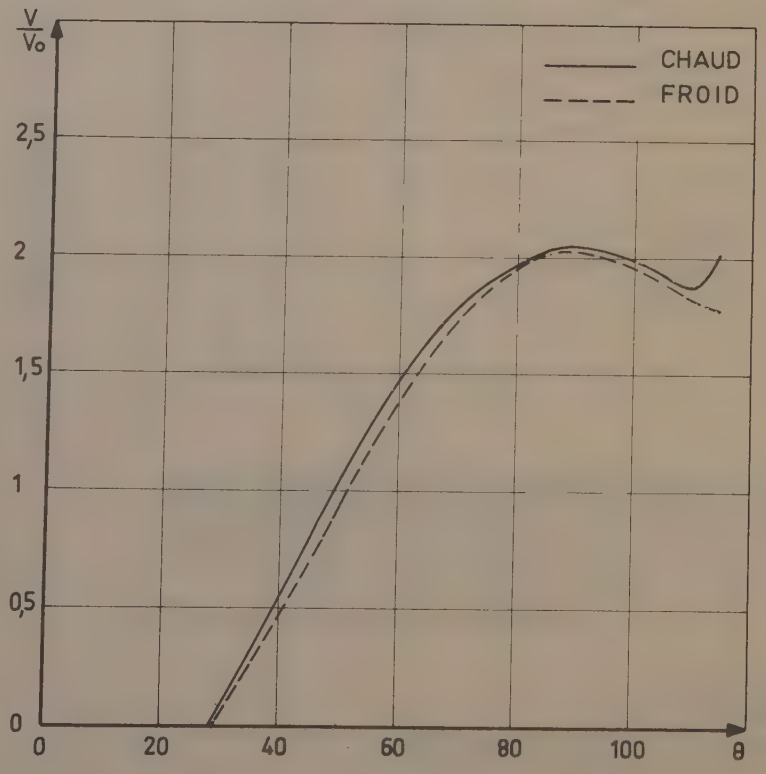


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 7

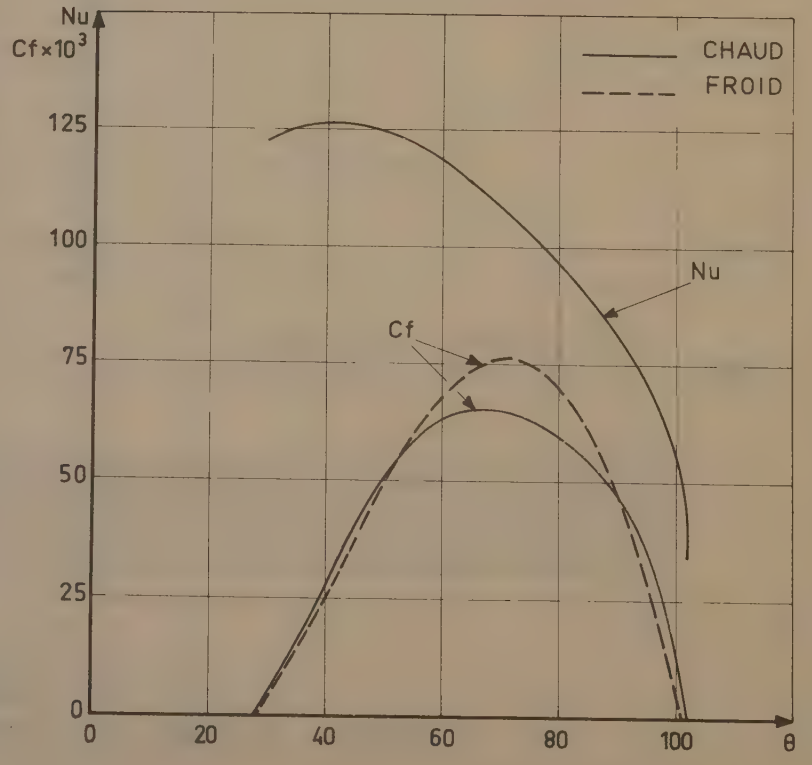
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	2.10	2.20	2.34	2.47	2.62	2.76	2.79	2.67	2.38	1.92	1.52	1.02	0.51	0.00	-0.54	-1.06	-1.20	-1.64	-1.71	-1.60	-1.41	-1.18	-0.93
FROID	2,06	2,14	2,22	2,30	2,38	2,45	2,46	2,36	2,17	1,93	1,54	1,07	0,59	0,08	-0,55	-1,07	-1,40	-1,62	-1,68	-1,62	-1,41	-1,20	-0,97

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

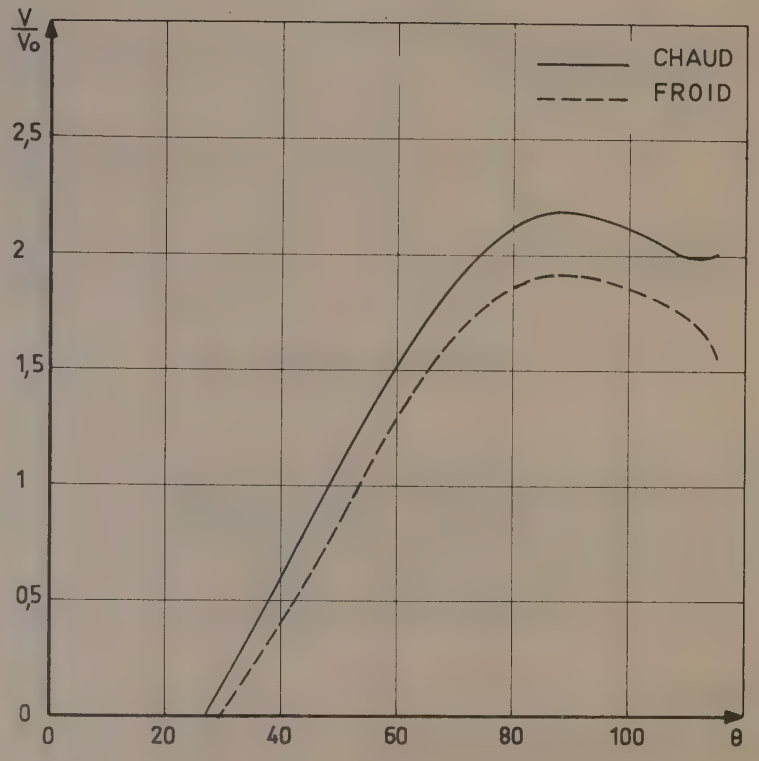


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 8

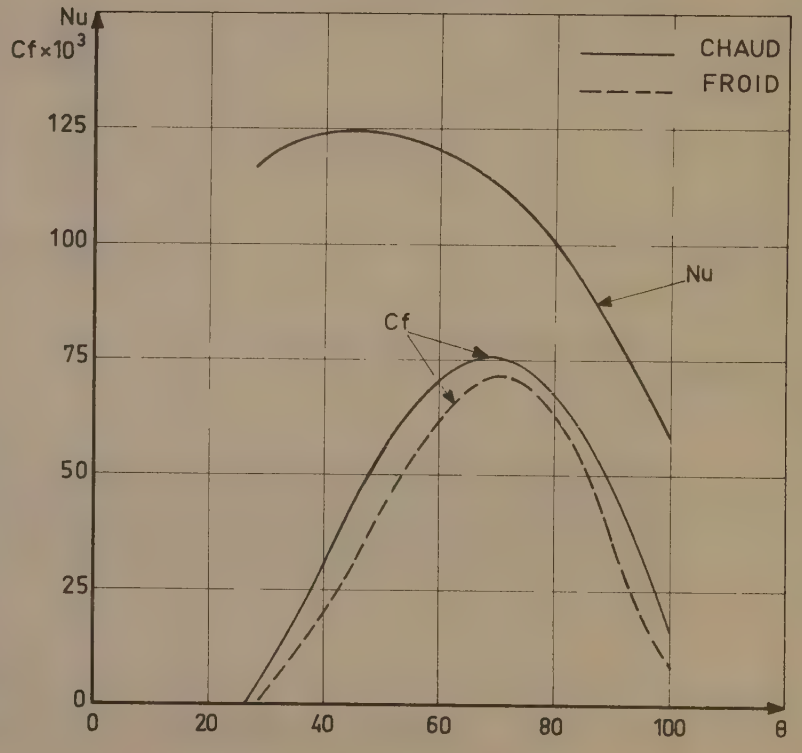
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	2.60	2.62	2.67	2.78	2.92	2.99	2.97	2.84	2.57	2.18	1.72	1.11	0.43	-0.20	-0.75	-1.28	-1.74	-2.02	-2.10	-1.98	-1.77	-1.51	-1.20
FROID	1,71	1,72	1,74	1,79	1,85	1,92	1,93	1,86	1,71	1,50	1,20	0,80	0,34	-0,25	-0,88	-1,25	-1,56	-1,72	-1,77	-1,68	-1,55	-1,38	-1,18

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

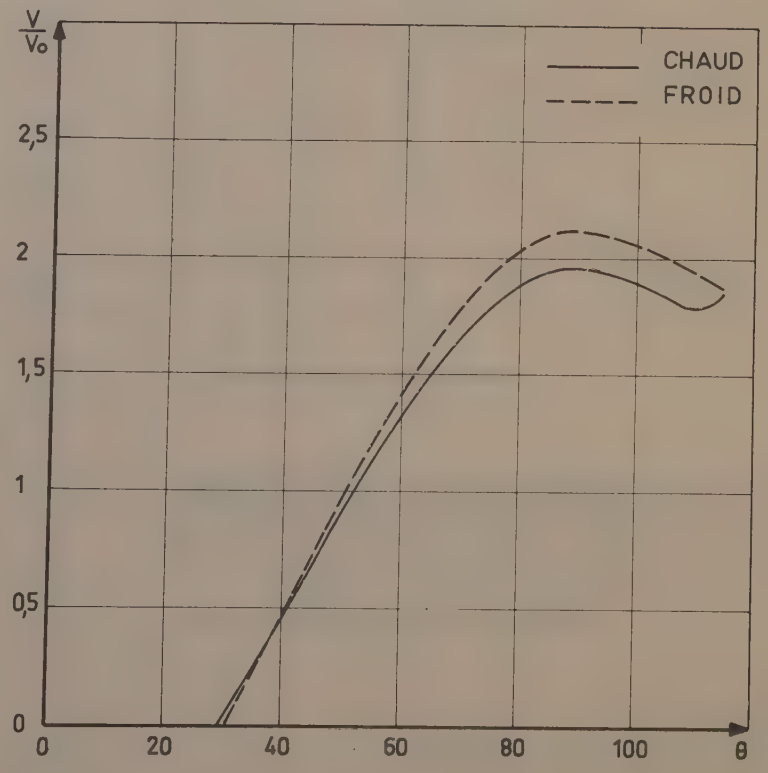


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE Nº 9

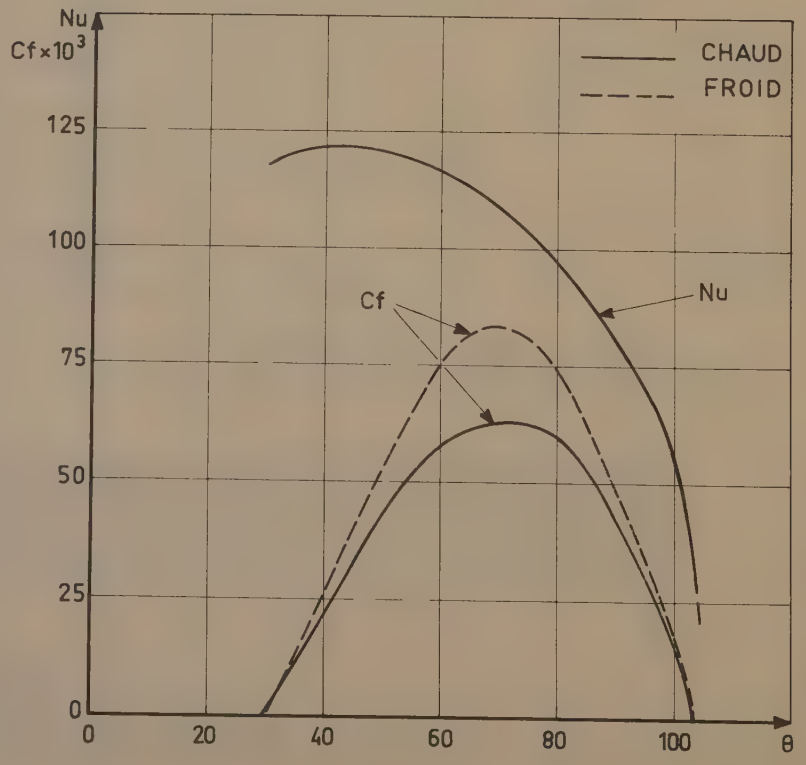
I_ COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	1,94	1,99	2,07	2,18	2,28	2,40	2,46	2,40	2,18	1,86	1,50	1,04	0,54	0,00	-0,48	-0,91	-1,29	-1,56	-1,65	-1,57	-1,38	-1,16	0,94
FROID	2,16	2,25	2,36	2,50	2,64	2,71	2,71	2,64	2,43	2,14	1,83	1,25	0,65	0,00	-0,61	-1,10	-1,50	-1,74	-1,84	-1,74	-1,56	-1,36	-1,10

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT NOMBRE DE NUSSELT LOCAL

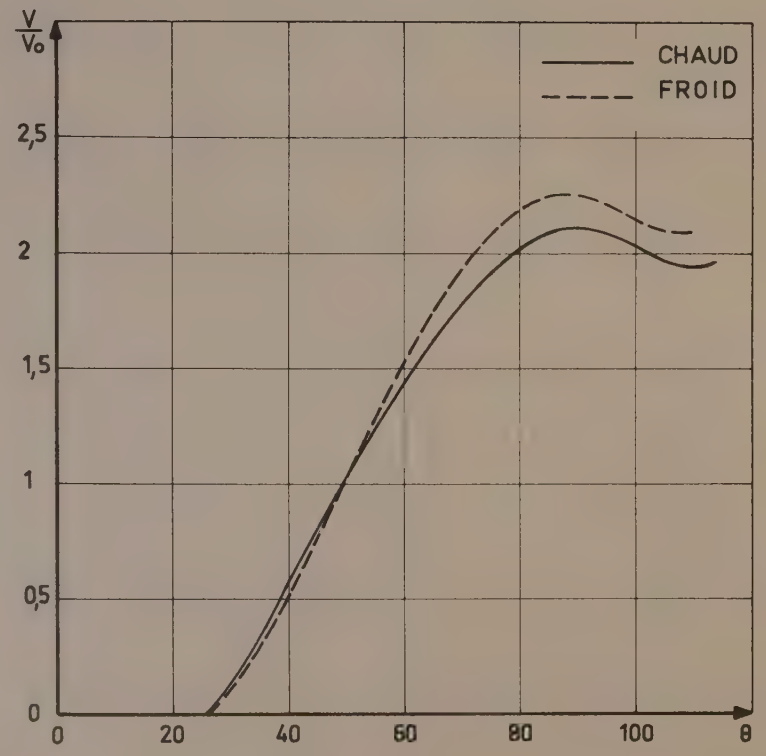


RÉSULTATS DU CALCUL DE COUCHE – LIMITE
RANGÉE N° 10

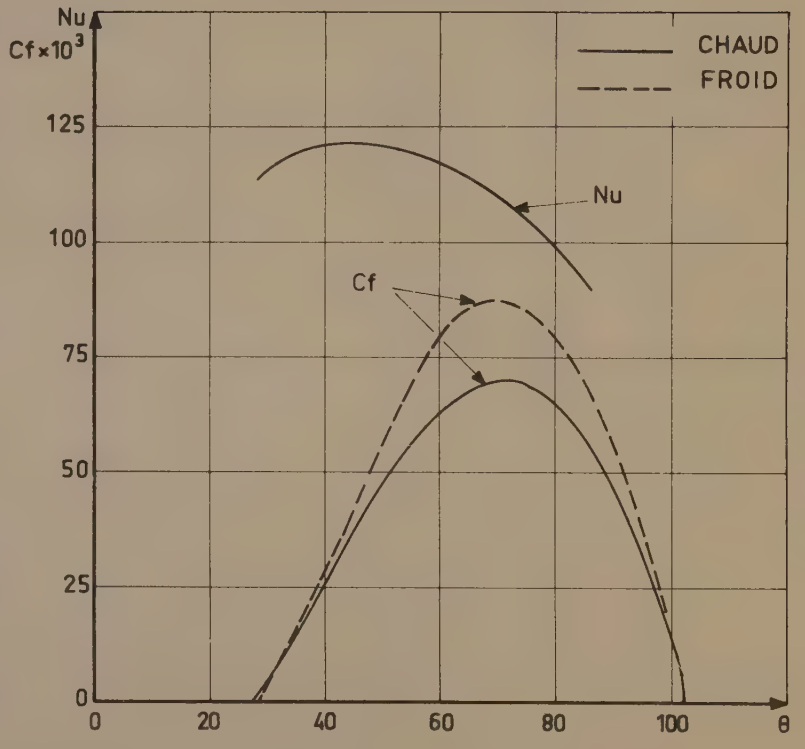
I – COEFFICIENT DE PRESSION

θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
CHAUD	2,10	2.10	2.14	2.25	2.42	2.50	2.45	2.31	2.10	1.76	1.36	0.72	0.30	-0.27	-0.92	-1.44	-1.86	-2.14	-2.28	-2.18	-1.94	-1.66	-1.38
FROID	0,68	0,70	0,80	0,92	1,01	1,08	1,08	0,94	0,72	0,44	-0,02	-0,66	-1,28	-1,92	-2,60	-3,16	-3,68	-4,00	-4,10	-3,98	-3,82	-3,60	-3,34

II VITESSE CALCULÉE



III COEFFICIENT LOCAL DE FROTTEMENT
NOMBRE DE NUSSELT LOCAL



DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

"PROBLÈMES POSÉS PAR LES ÉCOULEMENTS DANS LES AMPLIFICATEURS FLUIDES".

Vu et approuvé :
Paris, le 25 octobre 1966
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Marc ZAMANSKY

Vu
et Permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie
de Paris,
Jean ROCHE

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
Ouvrages scientifiques
TYPO-OFFSET
GAP (Hautes-Alpes)
Dépôt légal n° 161
1967

Le Directeur de la Publication : R. HONORÉ